



L'injection d'agrégats dans une source ECR et le transport aval pour TANCREDE

J. Arianer

► To cite this version:

J. Arianer. L'injection d'agrégats dans une source ECR et le transport aval pour TANCREDE. 2001, pp.34. in2p3-00019291

HAL Id: in2p3-00019291

<https://hal.in2p3.fr/in2p3-00019291>

Submitted on 24 Apr 2001

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

L'INJECTION D'AGREGATS DANS UNE SOURCE ECR & LE TRANSPORT AVAL

J. ARIANER
décembre 2000

Résumé

L'étude d'une injection d'agrégats émanant d'une source à pointe liquide dans une source à résonance cyclotronique met en évidence quelques difficultés et un rendement faible.

L'approche théorique met en avant des aspects en général négligés dans les études précédentes. La simulation du transport est faite par un code original dont les méthodes de calcul sont développées.

L'analyse des agrégats multichargés issus de la seconde source par différents systèmes est faite par simulation avec un autre code original.

Abstract

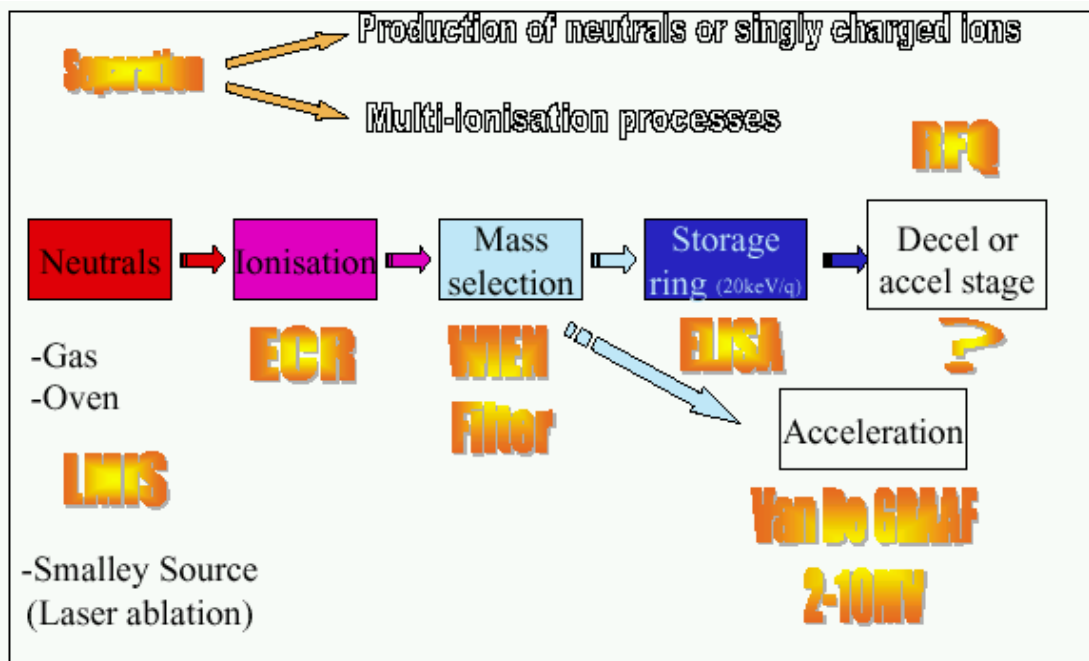
This report treats 1) the launching of ionised clusters issued from a liquid metal ion source into a resonance cyclotron source used as a charge breeder. After a theoretical approach revealing some difficulties never commented previously, a simulation of this special kind of transport has been made with an original code.

2) the transport and mass analysis of the multicharged clusters with a second code.

The computation methods are described.

Key words : clusters- beam injection- beam transport- ion beams- ion sources

Le projet TANCREDE (ECR+ TANDEM) est un ensemble expérimental articulé autour de l'utilisation de particules de masses élevées (macromolécules et agrégats) ayant une large gamme d'énergie pour faire diverses recherches de base sur l'interaction matière-particules lourdes.



L'énergie finale à la sortie d'un accélérateur croît avec l'état de charge. La multi-ionisation de particules lourdes (nous dirons d'agrégats) est une opération délicate. Elle s'effectue en 3 étapes :

- leur production sous forme d'ions monochargés dans une source S1 dédiée ayant de bonnes propriétés optiques (émittance et dispersion en énergie longitudinale)
 - le transport avec un premier tri de particules et un système optique de focalisation créant les conditions ad hoc pour injecter dans une seconde source S2, amplificatrice de charges
 - ladite seconde source utilisant une induction magnétique dans laquelle il faut entrer sans pertes. Le transport précédent s'effectue à énergie élevée (quelques dizaines de keV), il faut donc ralentir sévèrement les agrégats à l'entrée de cette seconde source pour que l'ionisation multiple par impact électronique ait le temps de se faire.
- On voit qu'un choix majeur du projet TANCREDE est celui d'une source à résonance cyclotronique (appelée couramment ECR par anglicisme « electron cyclotron resonance ») comme amplificateur de charges. Nous discuterons des autres configurations possibles.

Les ions multichargés issus de l'ECR sont eux aussi accélérés à basse énergie, focalisés, triés avant d'être injectés dans un accélérateur. C'est le rôle du transport aval, le transport amont étant celui de l'injection dans l'ECR.

Ce rapport traite des 2 transports.

1-LE TRANSPORT AMONT-L'INJECTION DANS UNE SOURCE ECR.

L'injection d'ions issus d'une source dans une autre a été mise en œuvre pour la première fois à l'IPN d'Orsay sur SILFEC3 [1]. L'idée a été reprise sur nombre d'autres sources avec un succès grandissant ; elle permet de découpler les problèmes technologiques, par exemple : dans une première source, on crée des atomes neutres métalliques par des voies « sales » (haute température, composés agressifs...), on les ionise simplement et ces ions sont injectés dans une source d'ions multichargés qui travaille généralement dans des conditions restrictives (basse pression, injection pulsée...). Autre exemple : on produit des ions radioactifs à faible durée de vie dans un ensemble cible-source chaud, dégazant et à haute pression, à forte efficacité d'ionisation simple et on envoie ces ions, après tri, dans une source « booster », qui parfois joue aussi le rôle d'accumulateur mettant le paquet d'ions multichargés dans l'acceptance temporelle de l'accélérateur suivant.

C'est la voie $1+ \rightarrow n+$

Très à l'ordre du jour pour produire des ions radioactifs et qui est utilisée avec les couplages suivants, pour différentes applications :

- LMIS (liquid metal ion source)-ECR pour TANCREDE
- Source à ionisation de surface-ECR pour PIAFE Grenoble et HOLIFIELD Oak Ridge
- Duoplasmatron-EBIS (electron beam ion source) à SATURNE et au MSI Stockholm
- FEBIAD (forced electron beam induced arc discharge)-EBIS pour l'ensemble REX-ISOLDE au CERN
- FEBIAD-ECR à l'HOLIFIELD et à GANIL (SPIRAL)
- MEVVA (metal vapour vacuum arc)-EBIS sur la SUPEREBIT du LLL.

Beaucoup d'études ont été faites sur ce couplage et les problèmes connectés à l'injection, toujours dans une induction axiale élevée que ce soit dans une ECR ou une EBIS. Aucune n'a traité le sujet du point de vue théorique. Celle qui suit tente de le faire et ajoute une pierre à l'édifice.

1-1-Problèmes liés à l'injection d'ions dans une source .

Ils sont communs à tous les couplages. Evoquons les brièvement avant de les passer en revue en détail. La source S1 émet des ions avec une émittance et une dispersion en énergie données. Ensuite, ces ions sont accélérés et focalisés dans un transport pouvant avoir des limites en acceptance. Ce transport est hors induction magnétique. Enfin, un système électrostatique permet :

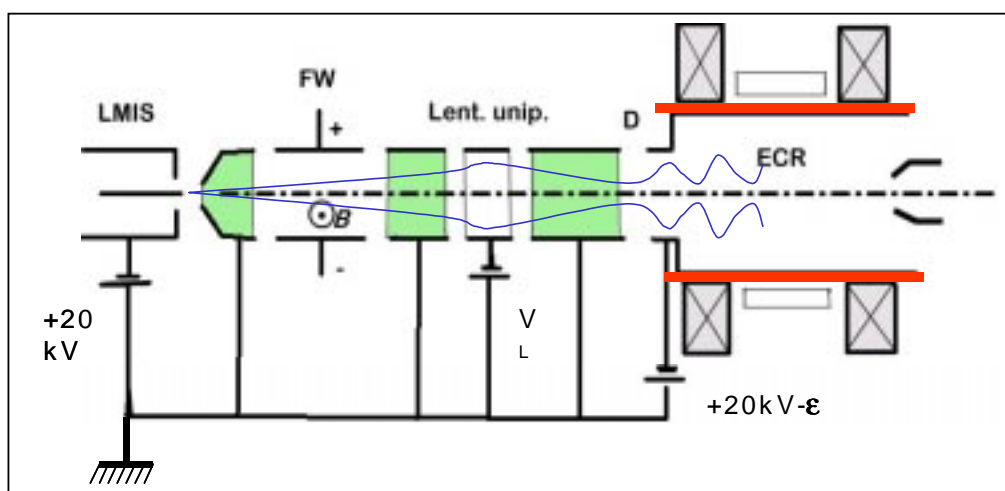
- a) de décélérer le faisceau incident à quelques eV pour qu'il soit emprisonné dans le plasma de la source S2.
- b) de focaliser le faisceau pour qu'il entre correctement dans le cône d'acceptance de l'induction de la source S2.

Ce système électrostatique s'inspire de l'exemple classique de l'injection électronique dans une induction magnétique axisymétrique pour créer un flot confiné. Il peut alors apparaître des limitations de charge d'espace ou des réflexions sur le gradient d'induction.

Tous ces problèmes ont des solutions qui sont parfois incompatibles avec l'arrangement des 2 sources et qui se traduisent par des pertes plus ou moins importantes du faisceau injecté. Ils sont aussi imbriqués : si c'est la nécessité de ralentir les ions primaires aux environs de 5 eV, pour qu'ils aient une chance d'être post-ionisés, qui

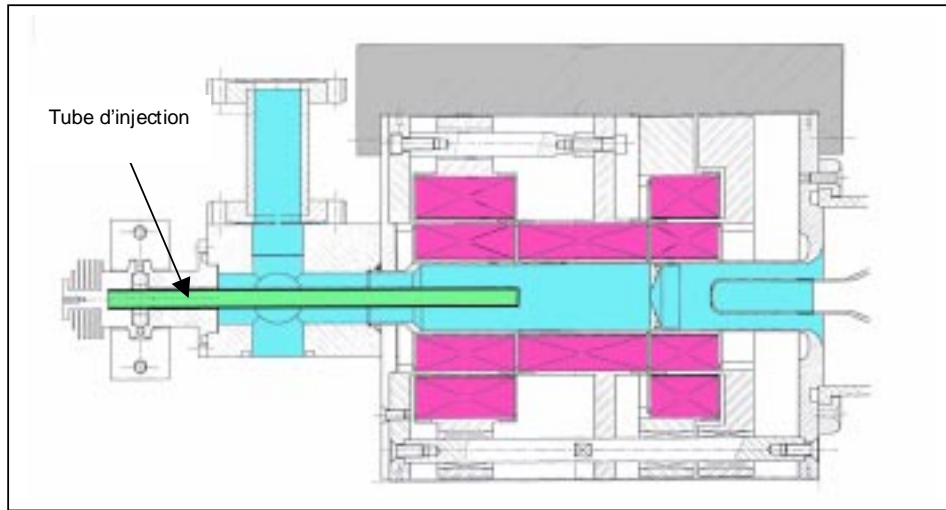
induit tous les autres problèmes, nous verrons que la capture est fortement dépendante des conditions d'entrée dans l'induction.

Avant de les passer en revue, on peut montrer un exemple de contexte de cette injection, celui de TANCREDE. Il sera aisé de transposer à une autre configuration. La source S1 est une source à pointe de métal liquide LMIS dont on extrait des agrégats. Nous avons choisi comme masse étalon d'études la masse $A=240$ proche de celle de l'or et correspondant au fullerène $3+$. Le faisceau est extrait avec une énergie maximale de 20keV par polarisation de la source pour avoir un transport globalement au potentiel de la terre. Il est focalisé par une série de lentilles unipotentielles (« einzel »=simple), trié grossièrement par un filtre de Wien FW, puis injecté dans une source S2 de type ECR Microgan 10GHz et décéléré en D. Son énergie résiduelle est ε dans l'induction de cette ECR.



1-1-1 L'adéquation entre l'émittance de S1 et l'acceptance de S2.

Le ralentissement induit un accroissement considérable de l'émittance géométrique de S1. Prenons $20 \pi \text{ mm.mrad}$ à 20keV par exemple, ceci devient $1265 \pi \text{ mm.mrad}$ à 5eV. Dans le cas du tube d'injection de la Microgan ci-dessous, de diamètre 10mm et de 25cm de long, l'acceptance n'est que de $130 \pi \text{ mm.mrad}$, soit une perte de faisceau pouvant atteindre 90% ! D'où l'impérative nécessité de décélérer après le tube, dans l'induction maximale, ce qui est préjudiciable par l'énorme surfocalisation qu'induit cette décélération. Il peut y avoir des configurations où celle-ci, qui impose un isolement dans la partie active de S2, s'avère problématique.



1-1-2 Les limitations en intensité par charge d'espace.

Un faisceau de particules chargées de masse m_i , d'intensité I , d'énergie V et de rayon r_F ne peut pas se propager dans n'importe quel tube de rayon r_T . Le champ électrique transverse créé par les charges en mouvement a pour conséquence une différence de potentiel entre l'axe et le bord du faisceau. Ce « puits de potentiel » se raccorde au potentiel du tube environnant. Si le puits résultant est de l'ordre de l'énergie initiale, le faisceau ne se propage plus. Le quotient $I/V^{3/2}$ appelé pervéance P est limité à :

$$P_{\max} = \frac{\alpha \sqrt{m_e}}{\sqrt{m_i} (1 + 2 \ln \frac{r_T}{r_F})}$$

avec $\alpha = 32.5 \cdot 10^{-6}$ pour un espace libre et $25.4 \cdot 10^{-6}$ après être entré dans une induction (flot confiné). Par exemple, à 5eV, un faisceau incident d' Ar^+ occupant le 1/10 du rayon de chambre de plasma est limité à $0.18 \mu\text{A}$ et la masse 240 dans les mêmes conditions est limitée à 2.3nA ! R.Geller [2] explique p.369 que le plasma est globalement positif sauf au centre (situation qui me semble irréalisable de façon stable), il risque donc d'y avoir formation d'une cathode virtuelle qui peut amener à un éclatement de faisceau ou à sa réflexion pour des intensités mêmes très faibles.

1-1-3 Les conditions d'injection dans le gradient d'induction. .

Un gradient d'induction est décélérateur. Dans le sens de la coordonnée s , au rayon r , on a :

$$\ddot{s} = -\frac{\eta^2 r^2}{2} \frac{\partial B_s}{\partial s}$$

avec η le rapport charge-sur-masse de l'ion considéré, ce qui explique l'action confinante d'un minimum d'induction et l'effet miroir d'une bosse. En fait, il transfère de l'énergie longitudinale en énergie radiale. Pour des vitesses axiales élevées, le moment magnétique d'une particule peut passer de zéro à une valeur telle que toute

l'énergie initiale se trouve transformée en énergie de rotation avec arrêt de la propagation. Ceci impose des conditions très sévères sur le rayon maximal du faisceau et sa convergence à l'entrée dans ce gradient : les conditions dites d'injection en flot de Brillouin.

Elles sont drastiques. Non respectées elles conduisent soit à un flot à enveloppe festonnée soit à une réflexion du faisceau, la principale concerne la pente à l'entrée du gradient [3] :

$$\left(2^{3/2} \eta^{1/2} \epsilon_0 \pi\right)^{1/2} \frac{dr}{Pdz} = -0.765$$

Le faisceau doit être d'autant plus convergent que la pervéance est grande. La rotation induit une série de phénomènes secondaires importants souvent négligés. L'énergie de rotation, exprimée en eV, est :

$$W_{\perp} = \frac{\eta B^2 r^2}{2}$$

en prenant l'exemple d'un ion Ar^+ entrant à 2cm dans 0.5T, cette énergie est de 120eV. Ceci explique que l'entrée dans le gradient doit se faire avec une taille de faisceau telle que cette énergie soit inférieure à l'énergie cinétique totale de l'ion. Par exemple, une décélération avant le gradient, induisant une surfocalisation, peut amener des particules à une extension radiale qui les ralentit considérablement, voire les réfléchit.

Dans le cas de la masse 240, l'énergie de rotation est quasi-négligeable.

1-1-4 La capture des ions dans S2.

On admet jusqu'à présent que le plasma dans l'ECR permet le refroidissement des ions incidents [4,5]. Une collision à 90° est censée transférer l'énergie longitudinale en énergie radiale.

Si l'on prend le cas de Ar^+ décéléré à 5eV dans l'ECR, cet ion tourne dans l'induction à une fréquence de $2 \cdot 10^5$ tours/s. Son mouvement est une hélice de 5mm de pas, donc la notion de collision à 90° perd son intérêt pour une particule qui est dans un plan quasi-transverse à la propagation moyenne. Les calculs de ralentissement se font en considérant un équilibre thermodynamique entre les ions et les électrons du plasma, or on sait que la température ionique T_i exprimée en eV se déduit de la température électronique T_e par [6] :

$$T_i = 0.037 \frac{T_e Z_i^2}{A} + 0.04$$

Z_i étant le nombre de charges des ions. Dans Microgan, T_e atteint 2000eV, ce qui donne $T_i = 20$ eV, on est loin de l'équilibre.

Cette température est confirmée par la dispersion en énergie des ions issus d'une ECR qui est proche de $20 Z_i$ eV.

En appliquant les formules de la théorie cinétique collisionnelle des plasmas [7], la décélération moyenne Γ subie par les ions incidents monochargés de masse m_a dans un plasma d'ions de masse m_b eux-aussi monochargés, de densité n est :

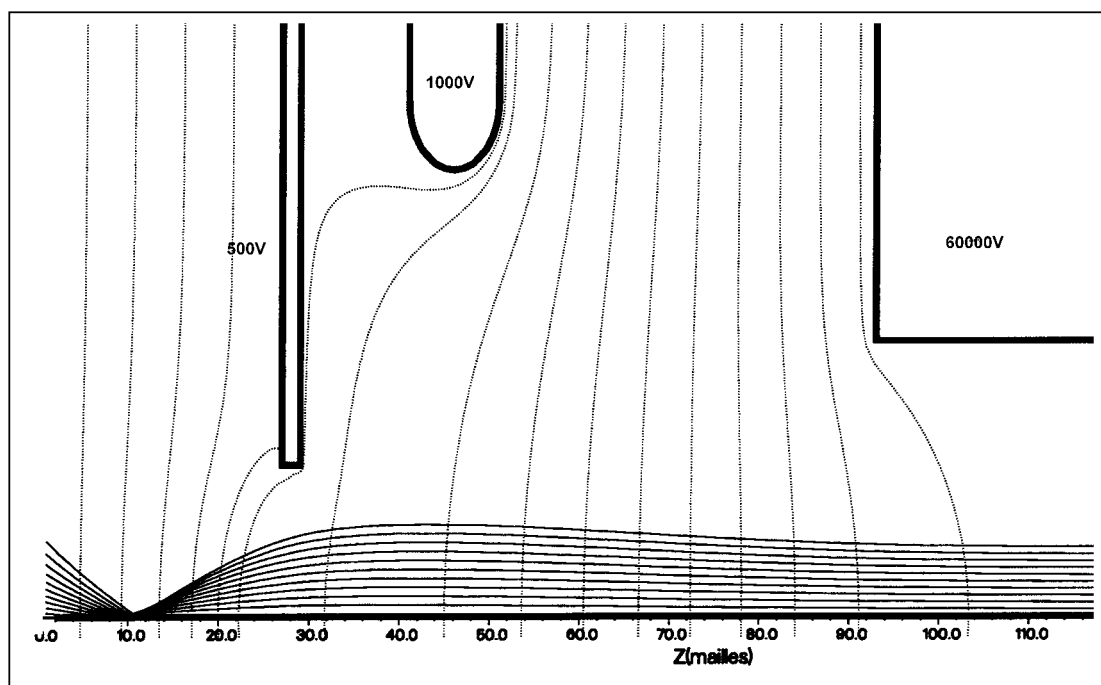
$$\Gamma = -\frac{n}{2\pi\epsilon_0^2} \left(\frac{e^2}{m_a v_b} \right) \left(1 + \frac{m_a}{m_b} \right) R \left(\frac{v_a}{v_b} \right) \text{Ln} \Lambda$$

R vaut 0.214 au maximum, le logarithme coulombien vaut 15÷20 environ dans une ECR.

Pour $n = 10^{11}/\text{cm}^3$ avec des ions Ar^+ incidents à 5eV sur des ions Ar^+ à T_i calculée précédemment, Γ est de l'ordre de -20m/s^2 . Le plasma ne ralentit donc pas sensiblement les ions incidents. Cette constatation est corroborée par le calcul du libre parcours moyen λ . La section efficace totale ne peut excéder 5.10^{-15}cm^2 , avec le n précédent, λ vaut 20m. Les collisions sont négligeables. La capture dans S2 doit faire appel à un autre processus.

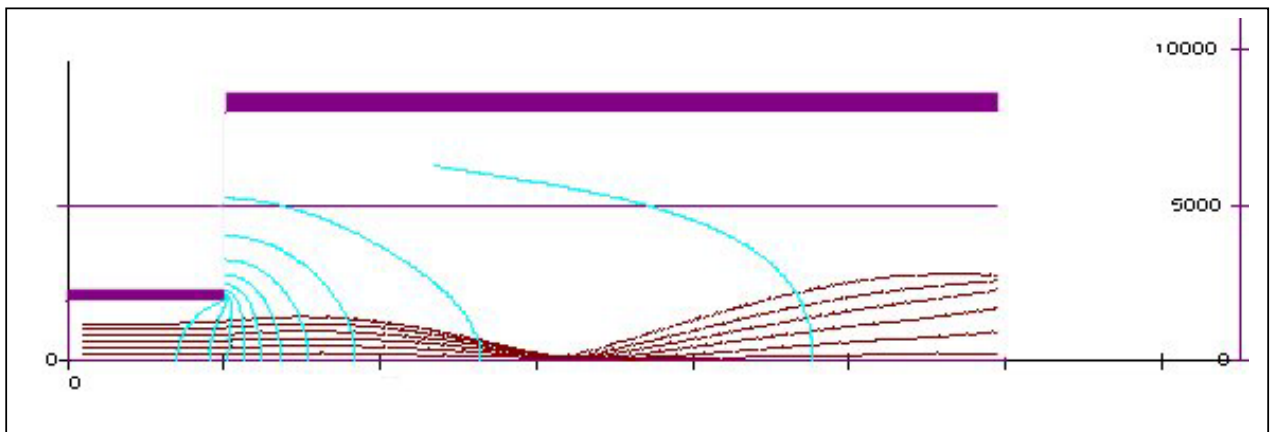
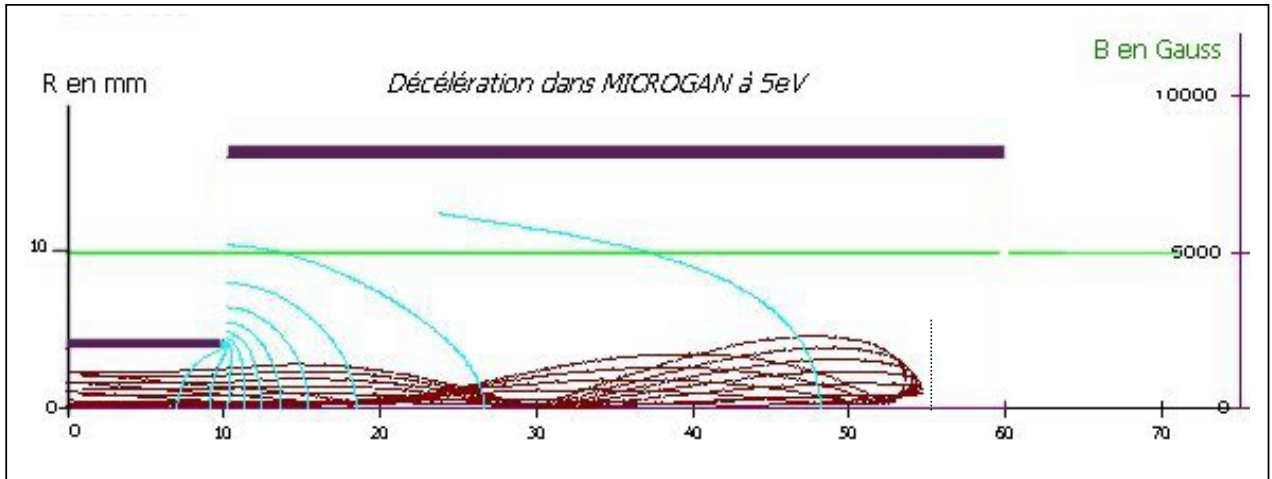
1-1-5 La décélération.

La décélération électrostatique du faisceau pour augmenter le temps de transit dans l'induction des particules que l'on souhaite post-ioniser, a 2 effets : accroître la pénétration au-delà de sa limite (formation d'une cathode virtuelle et explosion ou réflexion du faisceau) et apporter une surfocalisation qui accroît le rayon du faisceau à une valeur telle que toute son énergie cinétique est consommée par la rotation dans l'induction.



La figure ci-dessus montre le ralentissement d'un faisceau d'ions de 60 keV à 100 eV de la droite vers la gauche, sans induction. Les indices de réfraction associés aux dioptries sphériques formés par les dernières équipotentiels sont très inférieurs à 1, ce qui explique la surfocalisation. La première figure ci-dessous montre le comportement d'un faisceau de masse 240 décéléré à 5eV au niveau du trait pointillé vertical. Il fait demi-tour par apparition d'une cathode virtuelle et, du fait de la très forte induction magnétique repart vers la source d'émission. On constate aussi que les équipotentiels pénètrent profondément dans la chambre de sorte que la décélération semble s'effectuer dans les derniers mm de source !!

La figure suivante montre ce qu'il advient du faisceau juste avant l'apparition de la cathode virtuelle : il passe au travers de la source sans pertes.



Cette vision n'est cependant correcte qu'en absence de plasma. En considérant que la longueur de Debye est de quelques mm, c'est l'équipotentialité du plasma au potentiel de chambre qui permet d'allonger la zone à faible vitesse. Un savant ajustement des potentiels de l'LMIS et de l'ECR et une parfaite stabilité des conditions de plasma devraient autoriser des décélérations au niveau de 0.1eV soit des densités de $10^8 / \text{cm}^3$ expliquant les rendements actuels, par combinaison de la décélération électrostatique à 5 eV et de la charge d'espace longitudinale. Ceci pour un faisceau incident monocinétique. Le temps de transit est de l'ordre de $0.2 \mu\text{s}$ tandis que le temps d'ionisation ($\langle n\sigma v \rangle^{-1}$) est $> 1 \text{ms}$, ce qui rend très problématique ce type de couplage.

Si l'on rappelle que dans la théorie de l'ECR, il est admis qu'il y a un puits de potentiel à la fois radial et longitudinal, il en résulte une oscillation transverse des ions, qui transforme le mouvement hélicoïdal décrit ci-dessus en un mouvement épicycloïdal. Le passage de $1+$ à $2+$ « double » la hauteur apparente des bosses de potentiel, ce qui explique le piégeage longitudinal intervenant après la double ionisation.

1-1-7 La dispersion en énergie.

Le faisceau incident possède une dispersion en énergie longitudinale liée au processus d'ionisation. En ions monochargés, cette dispersion vaut, en gros, 5 eV

pour un duoplasmatron, 20 eV pour une ECR et 60 eV pour une LMIS [8]. Au moment de la décélération, si l'on ralentit les plus rapides, les plus lents sont réfléchis et si l'on ralentit les plus lents, les plus rapides passent dans la source S2 sans être capturés. C'est une cause majeure du faible rendement de capture. La seule parade consiste à transvaser cette émittance longitudinale en émittance transverse pour homogénéiser la vitesse axiale qui est la seule importante pour la capture. On y parvient avec un dispositif dispersif comme un filtre de vitesse. On le règle pour placer les particules les plus lentes sur l'axe et ajuster le rayon des autres à l'entrée du gradient d'induction pour que leur excédent en énergie cinétique soit consommée exactement en énergie de rotation.

1-1-8 Conclusion.

Dans la haute induction axiale de la source MICROGAN, les ions ne sont pas ralentis par le plasma et ne peuvent pas toucher la paroi de chambre. L'équipotentialité du plasma permet de les ralentir électrostatiquement à très faible vitesse, le taux d'ionisation obtenu alors dans le plasma correspond alors à des densités ioniques incidentes supérieures à $10^8/\text{cm}^3$ (1 μA -0.1 eV). La dispersion en énergie initiale est le facteur de pertes le plus important. Il est clair que la transformation de cette « émittance longitudinale » en émittance transverse est la clé de l'augmentation du rendement d'ionisation. La faible longueur de transit et la trop forte température électronique dans la MICROGAN rendent problématique cette injection au même titre que l'ionisation successive d'agrégats dont les potentiels d'ionisation sont très faibles. Il est peu probable d'avoir une efficacité de capture supérieure à quelques %.

1-2-Les moyens de calcul utilisés.

Ils sont spécifiques aux problèmes posés, lesquels, en particulier l'injection d'ions dans une ECR, sont atypiques. Ils émanent de codes utilisés de longue date qui ont faits leurs preuves sur ISOLDE3, PILIS, COMPLIS et SELPO. Ils sont écrits en FORTRAN77 avec une logique simple et un manuel interne. Nous allons décrire les algorithmes qu'ils utilisent après avoir mentionné les gros codes universels qui ont permis leur validation.

1-2-1 Les moyens traditionnels.

Ce sont les codes de calcul à usage général qui permettent de traiter presque tous les cas de transport. Ils nécessitent une expertise et, de ce fait, ne sont pas conviviaux. Les sorties graphiques sont, le plus souvent, très pauvres. Nous les avons utilisés dans des cas très particuliers ou pour valider les codes dédiés que nous avons mis au point.

Le principal est EGUN ou EGN2 [9] qui a permis d'obtenir les 2 courbes précédentes. C'est un code de calcul de potentiels et de trajectoires en 2D tenant compte de la charge d'espace, utilisant les différences finies et l'intégration des équations différentielles du mouvement. Il est le pendant de SIMION 3D[10] en plus précis.

Le second est GLOSP [11] qui est un code à matrices de transfert qui complète TRANSPORT [12] parce qu'il traite les secteurs électrostatiques et le filtre de Wien au 3^e ordre en tenant compte des champs de fuite. L'évolution du faisceau se fait en définissant un espace des traces initial dont les paramètres directeurs sont déduits d'une multiplication de matrices représentatives des éléments de transport.

1-2-2 Nos codes de calcul.

Ils combinent les 2 méthodes de calcul précédentes. Le faisceau est représenté par des macro-particules dont les variables de position sont distribuées dans 2 diagrammes d'émittance xx' et yy' . Ils ont l'énorme avantage de traiter les lentilles unipotentielle (« einzel lens »). Ils sont au premier ordre bien qu'évolutifs, ce qui est suffisant pour établir une faisabilité.

Ils utilisent des entrées universelles: chaque élément de transport est affecté d'un code et caractérisé par ses éléments électriques et géométriques d'importance. Selon l'élément, on utilise une application linéaire ou l'intégration d'équations différentielles. Ces programmes tournent sous UNIX, ils utilisent les sorties graphiques de DISPLA et sont compilés et exécutés par la suite d'ordre `-use disspla -voir_diss -c -nomfic.for`.

Les équations du mouvement en coordonnées cartésiennes s'écrivent :

$$\begin{aligned}\eta^{-1} \dot{z} x'' &= x' y' B_x - (1+x'^2) B_y + y' B_z + \dot{z}^{-1} (E_x - x' E_z) \\ \eta^{-1} \dot{z} y'' &= (1+y'^2) B_x - x' y' B_y + x' B_z + \dot{z}^{-1} (E_y - y' E_z) \\ \dot{z}^2 &= \frac{2\eta V}{1+x'^2+y'^2}\end{aligned}$$

où : \dot{z} est la dérivée de z , abscisse, par rapport au temps, $\eta = q/m$ est le rapport charge-sur-masse de la particule considérée, x' , y' , x'' , y'' sont les dérivées premières et secondes de x et y par rapport à z , E_x , E_y et E_z sont les composantes selon x , y et z du champ électrique, B_x , B_y et B_z sont les composantes selon x , y et z de l'induction magnétique. V est le potentiel électrostatique.

Ces équations se simplifient en fonction de l'élément considéré. Pour les résoudre, il faut connaître l'induction B et le champ E (ou le potentiel V , $E = -\text{grad } V$) en tout point de l'espace. Comme cette étude est au premier ordre, ces grandeurs sont déduites soit d'expressions analytiques soit de développements limités.

a) L'intégration se fait par une variante de la méthode de Runge-Kutta du 4^e ordre. Supposons que l'équation différentielle à résoudre soit de la forme $y' = f(x, y)$. En prenant un accroissement en z , h , très petit (une fraction de mm), à partir de cette valeur, on peut trouver $y(x+h)$ en posant : $y(x+h) = y(x) + hK(x, y; h)$ et en approchant la valeur de K par un processus itératif en quatre temps.

Les équations correspondantes sont les suivantes : avec $q_0 = 0$

$$\begin{aligned}
K_1 &= h \cdot f(x, y) & K_2 &= h \cdot f(x + \frac{h}{2}, y_1) \\
y_1 &= y + \frac{1}{2}(K_1 - 2q_0) & y_2 &= y_1 + (1 - \frac{\sqrt{2}}{2})(K_2 - q_1) \\
q_1 &= q_0 + \frac{3}{2}(K_1 - 2q_0) - \frac{1}{2}K_1 & q_2 &= q_1 + 3 \cdot (1 - \frac{\sqrt{2}}{2})(K_2 - q_1) - (1 + \frac{\sqrt{2}}{2})K_2 \\
K_3 &= h \cdot f(x + \frac{h}{2}, y_2) & K_4 &= h \cdot f(x + h, y_3) \\
y_3 &= y_2 + (1 + \frac{\sqrt{2}}{2})(K_3 - q_2) & y_4 &= y_3 + \frac{1}{6}(K_4 - 2q_3) \\
q_3 &= q_2 + 3 \cdot (1 + \frac{\sqrt{2}}{2})(K_3 - q_2) - (1 + \frac{\sqrt{2}}{2})K_3 & q_4 &= q_3 + \frac{3}{6}(K_4 - 2q_3) - \frac{1}{2}K_4
\end{aligned}$$

Avec ces notations, on obtient :

$$K(x, y; h) = \frac{1}{6} \left(K_1 + 2(1 - \frac{\sqrt{2}}{2})K_2 + 2(1 + \frac{\sqrt{2}}{2})K_3 + K_4 \right)$$

Les formules ci-dessus pourraient être simplifiées, on les garde sous cette forme qui permet de calculer les termes K et les résidus q en une simple boucle DO.

On a donc déterminé y (x+h). En renouvelant l'opération, on peut calculer y (x+2h), et ainsi de suite.

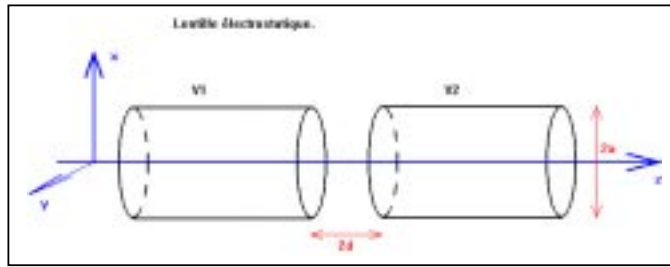
A partir de données initiales réalistes des différentes macro-particules représentatives du faisceau, à savoir pour chacune d'elles x, y, x', y' et la masse, on calcule x'' et y'' que l'on intègre une fois. Les valeurs de x' et y' ainsi déduites permettent de calculer x et y. On continue de proche en proche jusqu'à la fin de l'élément considéré.

A chaque pas h, on trie les macro-particules par ordre de distance croissante à l'axe pour déterminer l'enveloppe.

b) La connaissance des champs se fait à partir de développements limités s'ils sont à symétrie axiale. Au premier ordre, on sait que :

$$\begin{aligned}
V_{(r,z)} &= V_{(0,z)} - \frac{r^2}{4} \frac{d^2 V_{(0,z)}}{dz^2} & B_{(r,z)} &= B_{(0,z)} - \frac{r^2}{4} \frac{d^2 B_{(0,z)}}{dz^2} \\
E_r &= -\frac{\partial V}{\partial r} = \frac{r}{2} \frac{d^2 V_{(0,z)}}{dz^2} & B_r &= -\frac{r}{2} \frac{dB_{(0,z)}}{dz} \\
E_z &= -\frac{\partial V}{\partial z} = \frac{dV_{(0,z)}}{dz}
\end{aligned}$$

V et B(0,z) peuvent être déduits de forme analytique. Par exemple, une lentille unipotentielle est constitué de 2 éléments suivants :



pour lesquels :
$$V(0,z) = \frac{V_1 + V_2}{2} + \frac{V_2 - V_1}{2} \frac{a}{2\omega d} \operatorname{Ln} \left(\frac{\operatorname{ch} \omega \left(\frac{z+d}{a} \right)}{\operatorname{ch} \omega \left(\frac{z-d}{a} \right)} \right)$$

$$V'(0,z) = \frac{V_2 - V_1}{4d} \left(\operatorname{th} \omega \left(\frac{z+d}{a} \right) - \operatorname{th} \omega \left(\frac{z-d}{a} \right) \right) \quad (\omega = 1.318).$$

$$V''(0,z) = \frac{V_2 - V_1}{4a.d} \omega \left(\operatorname{th}^2 \omega \left(\frac{z-d}{a} \right) - \operatorname{th}^2 \omega \left(\frac{z+d}{a} \right) \right)$$

Cette approche est très sensée pour des électrodes longues. Dans le cas d'une lentille à électrode centrale courte, la dérivée première n'est pas continue au centre, ce qui induit une erreur dans le calcul des trajectoires. Potentiels et inductions peuvent aussi être déduits soit de mesures soit d'un autre programme (EGUN ou POISSON). A partir d'une suite de valeurs régulièrement espacées, on peut utiliser une interpolation de Newton-Grégory aux différences divisées pour déterminer les potentiels, champs et leur dérivées en tout point.

Supposons que nous connaissions, pour une série de positions x_0, x_1, x_2, x_3, x_4 , les valeurs d'une fonction telle que : $f(x_0) = y_0, f(x_1) = y_1, f(x_2) = y_2, f(x_3) = y_3, f(x_4) = y_4$. On cherche un polynôme de degré quatre prenant les mêmes valeurs en ces cinq points. Pour cela, nous allons poser que f est de la forme:

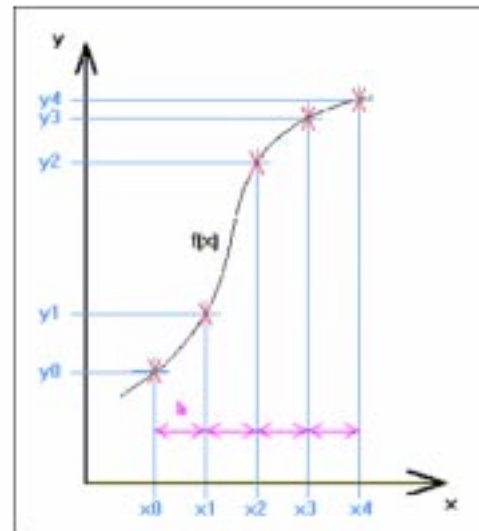
$$f(x) = a_0 + a_1(x-x_0) + a_2(x-x_0)(x-x_1) + a_3(x-x_0)(x-x_1)(x-x_2) + a_4(x-x_0)(x-x_1)(x-x_2)(x-x_3)$$

$$x_1 - x_0 = x_2 - x_1 = x_3 - x_2 = x_4 - x_3 = h.$$

En remplaçant successivement x par x_0, x_1, x_2, x_3 , puis x_4 dans l'expression de $f(x)$, on détermine les coefficients a_0, a_1, a_2 , et a_3 . On peut ensuite écrire le polynôme sous la forme :

$$f(x) = \lambda_0 y_0 + \lambda_1 y_1 + \lambda_2 y_2 + \lambda_3 y_3 + \lambda_4 y_4$$

Avec :



$$\begin{aligned}\lambda_0 &= 1 - \frac{x}{h} + \frac{x(x-h)}{2h^2} - \frac{x(x-h)(x-2h)}{6h^3} + \frac{x(x-h)(x-2h)(x-3h)}{24h^4} \\ \lambda_1 &= \frac{x}{h} - \frac{x(x-h)}{h^2} + \frac{x(x-h)(x-2h)}{2h^3} - \frac{x(x-h)(x-2h)(x-3h)}{6h^4} \\ \lambda_2 &= \frac{x(x-h)}{2h^2} - \frac{x(x-h)(x-2h)}{2h^3} + \frac{x(x-h)(x-2h)(x-3h)}{4h^4} \\ \lambda_3 &= \frac{x(x-h)(x-2h)}{6h^3} - \frac{x(x-h)(x-2h)(x-3h)}{6h^4} \\ \lambda_4 &= \frac{x(x-h)(x-2h)(x-3h)}{24h^4}\end{aligned}$$

Grâce à ces expressions, on peut interpoler $f(x)$ pour x quelconque. Appliquée à l'induction axiale mesurée de la source MICROGAN, par exemple, cette méthode fournit $B(0,z)$, $B'(0,z)$ et $B''(0,z)$ au voisinage du z considéré d'où l'on déduit :

$$B_x = -\frac{x}{2}B'(0,z)$$

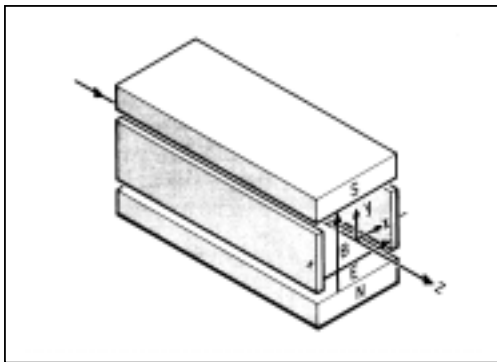
$$B_y = -\frac{y}{2}B'(0,z)$$

$$B_z = B(0,z) - \frac{x^2 + y^2}{4}B''(0,z)$$

Dans le cas de la lentille unipotentielle, au lieu de l'utilisation des formes analytiques décrites précédemment, il est possible d'entrer la géométrie dans EGUN, de résoudre dans celle-ci l'équation de Laplace qui permet de déduire le potentiel en tout point du maillage, donc sur les nœuds axiaux. Les potentiels étant à une constante multiplicative près, il est possible, avec la méthode d'interpolation précédente, de connaître les paramètres électriques en tout point de la lentille.

c) Le filtre de Wien est un sélecteur de vitesse utilisant un champ électrique E_x croisé avec une induction magnétique B_y . Soit V l'énergie exprimée en volts de la particule voyageant sur l'axe. Sa vitesse longitudinale est :

$$\dot{z}_0 = \sqrt{2\eta V}$$



On peut équilibrer la force de Laplace avec celle de Coulomb pour que cette particule traverse le filtre sans déviation, ce qui

$$\text{implique : } z_0 = \frac{E_x}{B_y}$$

Pour tout autre particule, les équations du mouvement deviennent :

$$\ddot{x} = \eta(E_x - \dot{z}B_y)$$

$$\ddot{z} = \eta \dot{x}B_y$$

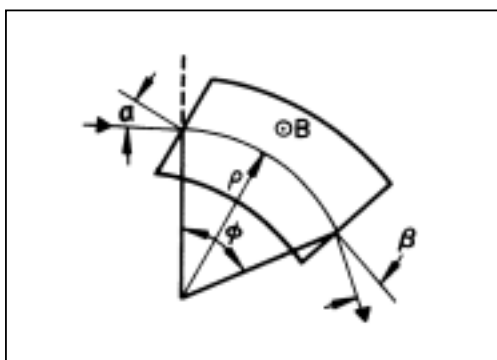
Combinées ces équations donnent pour le plan horizontal, seul affecté :

$$x'' = -\frac{\eta B_y^2}{E_x} \left(\frac{\eta B_y^2}{E_x} x - \left[1 - \frac{\dot{z}B_y}{E_x} \right] \right)$$

Nous avons traité le cas d'un filtre idéal avec des champs en créniaux.

Ce type de filtre a les propriétés dispersives d'un secteur magnétique en maintenant le faisceau désiré en ligne droite mais il rompt la symétrie axiale.

d) L'aimant à secteur à faces inclinées peut se traiter avec 3 matrices successives



(afin de rendre la sortie graphique plus réaliste). Les angles de faces sont notés positivement selon la figure. En x, on a :

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 \\ \frac{\text{tg}\alpha}{\rho} & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \cos \varphi & \rho \sin \varphi & \rho(1 - \cos \varphi) \\ -\frac{\sin \varphi}{\rho} & \cos \varphi & -\sin \varphi \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ \frac{\text{tg}\beta}{\rho} & 1 \end{vmatrix}$$

En y, on a :

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{\text{tg}\alpha}{\rho} & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & \rho\varphi \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{\text{tg}\beta}{\rho} & 1 \end{vmatrix}$$

Dans certaines versions de ce type de code, on intègre les équations différentielles du mouvement dans le secteur, en conservant l'action de matrices de transfert pour les faces d'entrée. Ces matrices peuvent être aisément modifiées pour tenir compte d'un indice ou de pôles ronds.

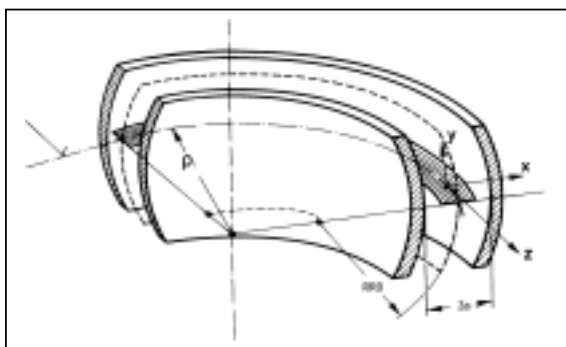
e) Les quadrupoles électrostatiques sont traités avec intégration des équations du mouvement. On sait que dans un quadrupole idéal, les équipotentielles sont des portions d'hyperboles et donc que les forces de Coulomb transverses sont proportionnelles aux elongations. Si V_e est le potentiel sur une électrode et a le rayon de gorge, on a :

$$E_x = \frac{2V_e}{a^2} \text{ et } E_y = -E_x$$

ou l'inverse pour E_x selon que le quadrupole est focalisant ou non dans ce plan.

Les équations du mouvement s'écrivent simplement :

$$x'' = \frac{V_e}{a^2 V} x \text{ et } y'' = -\frac{V_e}{a^2 V} y$$



f) L'infecteur électrostatique est aussi traité par intégration. Le rayon principal est ρ , le rayon secondaire RR_0 . Pour un faisceau monocinétique, les équations du mouvement s'écrivent :

$$x'' = -\frac{2-c}{\rho^2} x \text{ et } y'' = -\frac{1}{\rho^2} y, c = \frac{\rho}{RR_0}$$

g) L'espace de glissement est l'objet d'une matrice. Le traitement de la charge d'espace amène à ajouter un terme correcteur aux équations différentielles et à substituer aux matrices de transfert des éléments non ponctuels les dites équations.

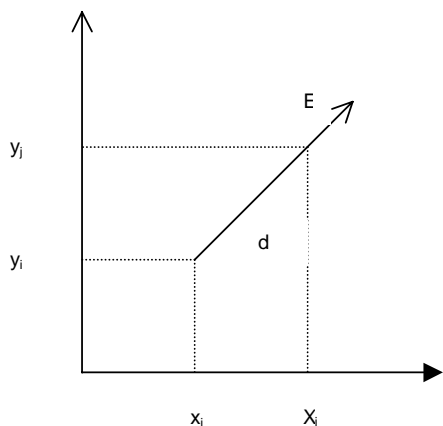
Si le faisceau est représenté par KMAX macro-particules de même poids, elle induit une densité linéique de charge λ , pour un courant total I :

$$\lambda = \frac{I}{\dot{z}KMAX}$$

Du théorème de Gauss appliqué à un cylindre de longueur unité englobant la particule de coordonnées x_i, y_i , on déduit les composantes de champ agissant sur la particule située à x_j, y_j :

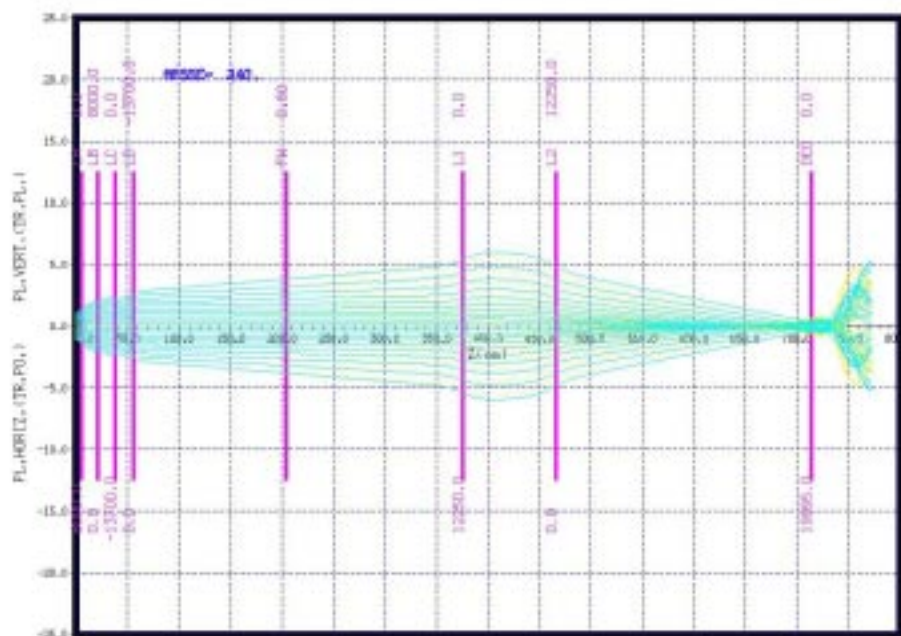
$$E_x = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \frac{x_j - x_i}{d^2} \text{ et } E_y = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \frac{y_j - y_i}{d^2}$$

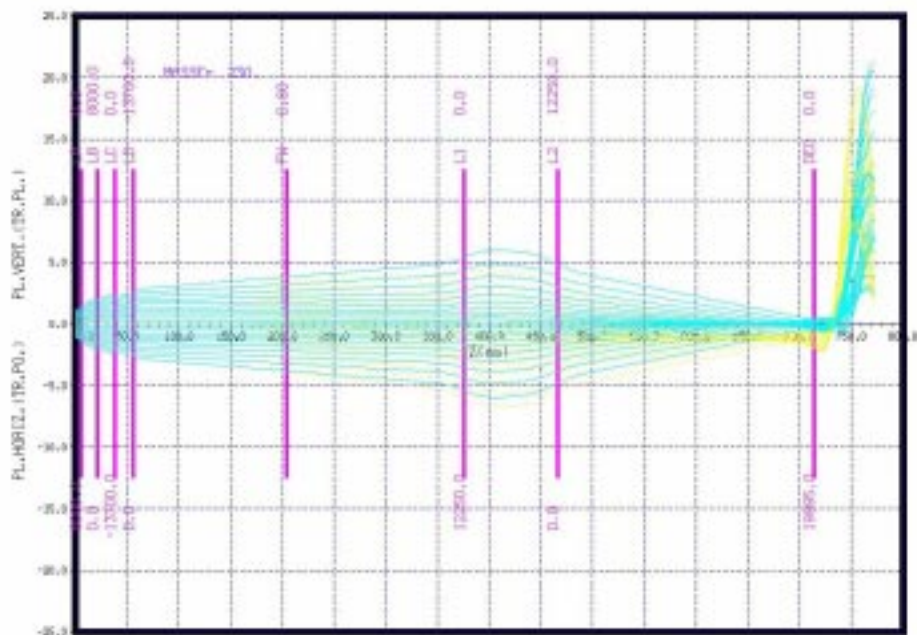
Il suffit de sommer les actions des KMAX-1 particules agissant sur celle considérée.



1-3-Résultats concernant le transport aval.

Le code de calcul basé sur ces méthodes (TCD.FOR) donne les résultats illustrés sur les figures suivantes (ordonnées en mm, jaune pour le plan horizontal):





La ligne de transport part de la source LMIS suivie d'une focalisation à 4 électrodes, déjà adaptée à cette source.

Le filtre de Wien, lui aussi récupéré d'ORION, est peu efficace en dispersion si l'on compare le comportement de la masse parasite 230 pour un calage sur 240, mais le grandissement de la lentille de décélération qui suit est tellement important que celle-là est éjectée sur les parois du tube d'injection. La lentille unipotentielle placée à l'entrée de la MICROGAN permet de focaliser le faisceau très précisément dans l'espace décélérateur de sorte que la transmission soit totale jusque dans l' ECR.

ELEMENT	Z initial	Z final	Diamètre	Paramètre
Pointe LMIS		-24		
2 ^e fente		-13		+ 20kV
Extracteur	-4	+2	1	0
LA	7	19	8.6 et 4.8	+ 8kV
LB	23	36	4.8	0
LC	40	52	4.8 et 8.6	-13.7kV
LD	58	96	8.6	0
FW	140	265	10	0.6T
L1	320	375	50	0
L2	360	460	50	+ 15kV
L3	465	503	50	0
Tube Inj	494	705	8	0
Décélération	705	705	8 à 40	+ 19.995kV
ECR	635	855	40	+ 19.995kV

Ce tableau donne les caractéristiques géométriques et électriques des éléments utilisés dans la ligne amont (dimensions en mm).

2-LE TRANSPORT AVAL- L'ANALYSE DES AGREGATS MULTI-CHARGES.

Il a fait l'objet d'une note succincte [13]. Le but est d'étudier les capacités d'analyse d'agrégats multichargés en utilisant des éléments pré-existants.

2-1-Les données de base.

Ce transport sans charge d'espace est un système classique comportant des éléments de focalisation et un ou deux aimants d'analyse. Les éléments existants sont une lentille unipotentielle (Pantchnik) et un ou deux aimants récupérés à SATURNE (HDM1&HDM2, $0.5T-r=0.45m-51^\circ$) auxquels peuvent s'ajouter des quadropoles et des inflecteurs électrostatiques de type COMPLIS. Le potentiel d'accélération maximale est de $V=10kV$. La masse étalon d'étude est 240 correspondant au fullerène 3 fois chargé. Toute autre masse A peut être déviée dans ces aimants pourvu que $AV=2.441 \cdot 10^6$.

L'émittance de l'ECR, fournie par les demandeurs, correspond à un rectangle dans les 2 plans $\pm 6mrad \pm 2.5mm$. Cette valeur est sans commune mesure avec ce qui est publié : l'émittance normalisée est $\# 10^{-6}m.rad$ soit $1000mm.mrad$ dans notre cas.

2-2-Les résultats.

Un autre code a été construit avec les mêmes méthodes de calcul que celles décrites précédemment : TANC.FOR.

Différentes configurations sont possibles selon la résolution en masse souhaitée.

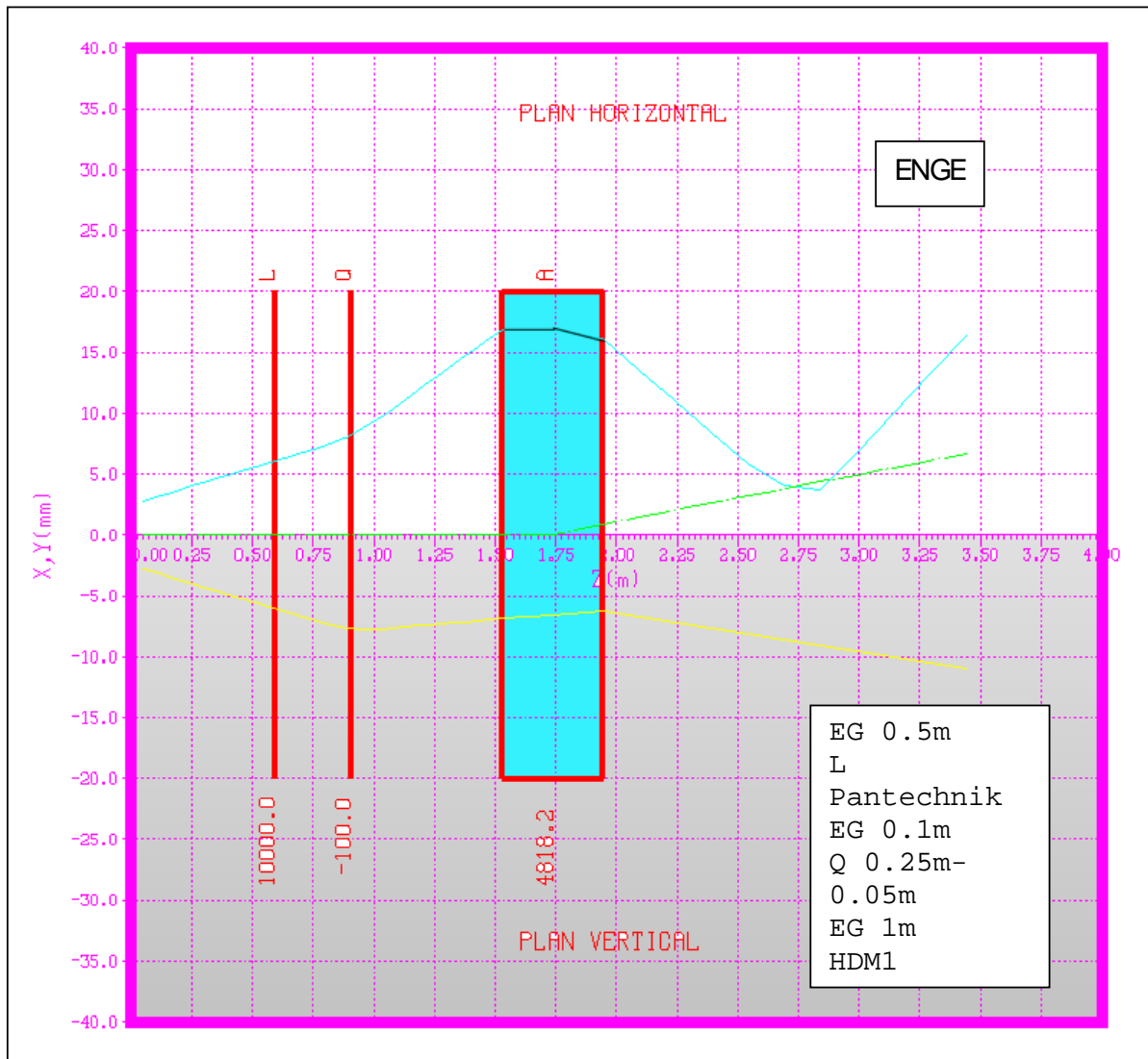
a) La solution de type ENGE : une lentille unipotentielle suit l'ECR puis un singulet pour rapprocher l'objet dans le plan horizontal et assurer la focalisation verticale. L'aimant HDM1 est sans indice et sans angles de faces polaires, il ne focalise que dans le plan horizontal.

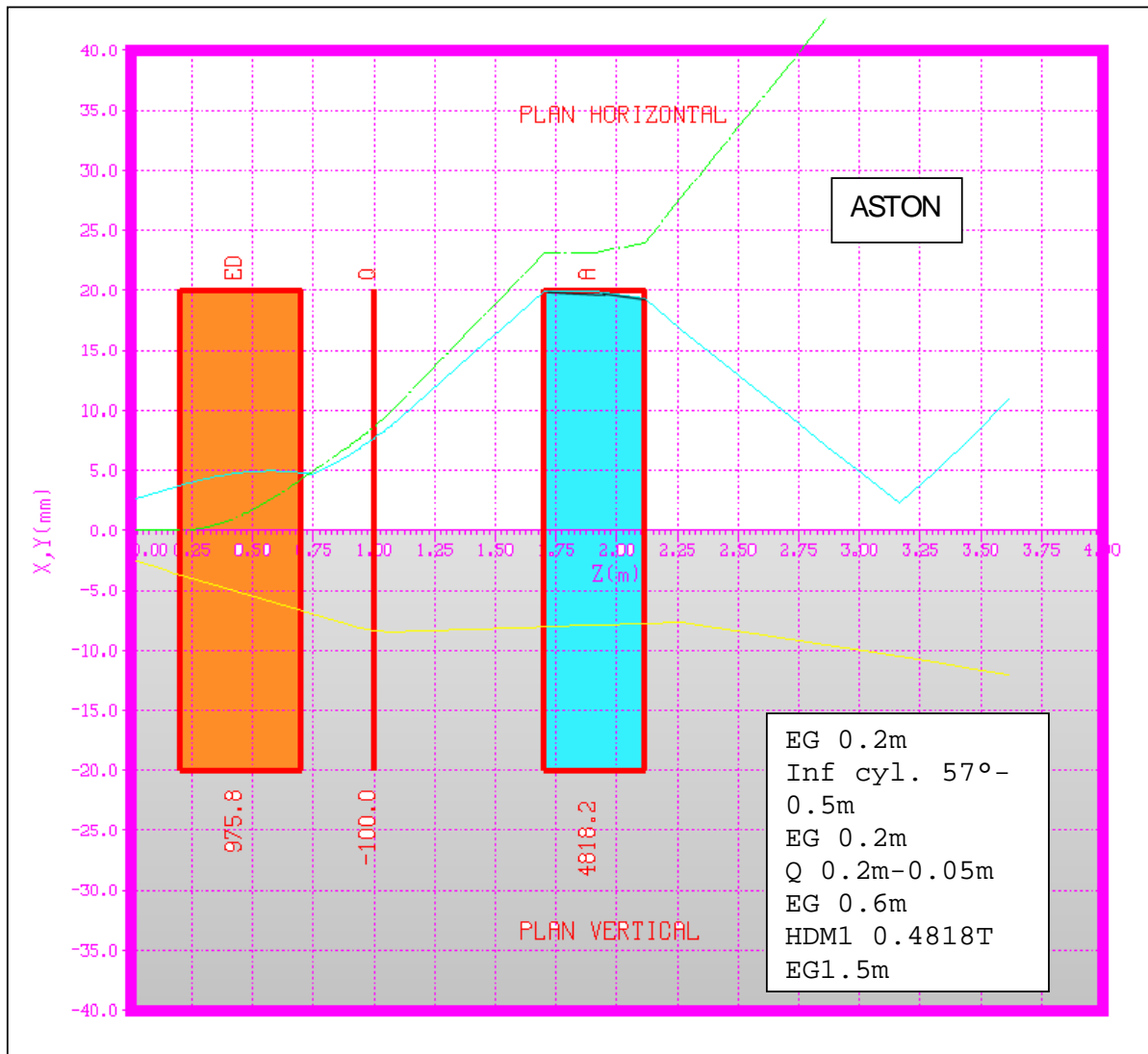
Le résultat est conforme à la figure ci-dessous. Les paramètres électriques et géométriques vitaux sont inscrits dans le tableau (EG espace de glissement). La ligne trait-point correspond au comportement du centroïde d'un faisceau de $A/\Delta A$ de 100. On voit que la résolution en masse est limitée à 50. Cette solution économique permet d'éliminer les polluants légers dans le spectre de masses.

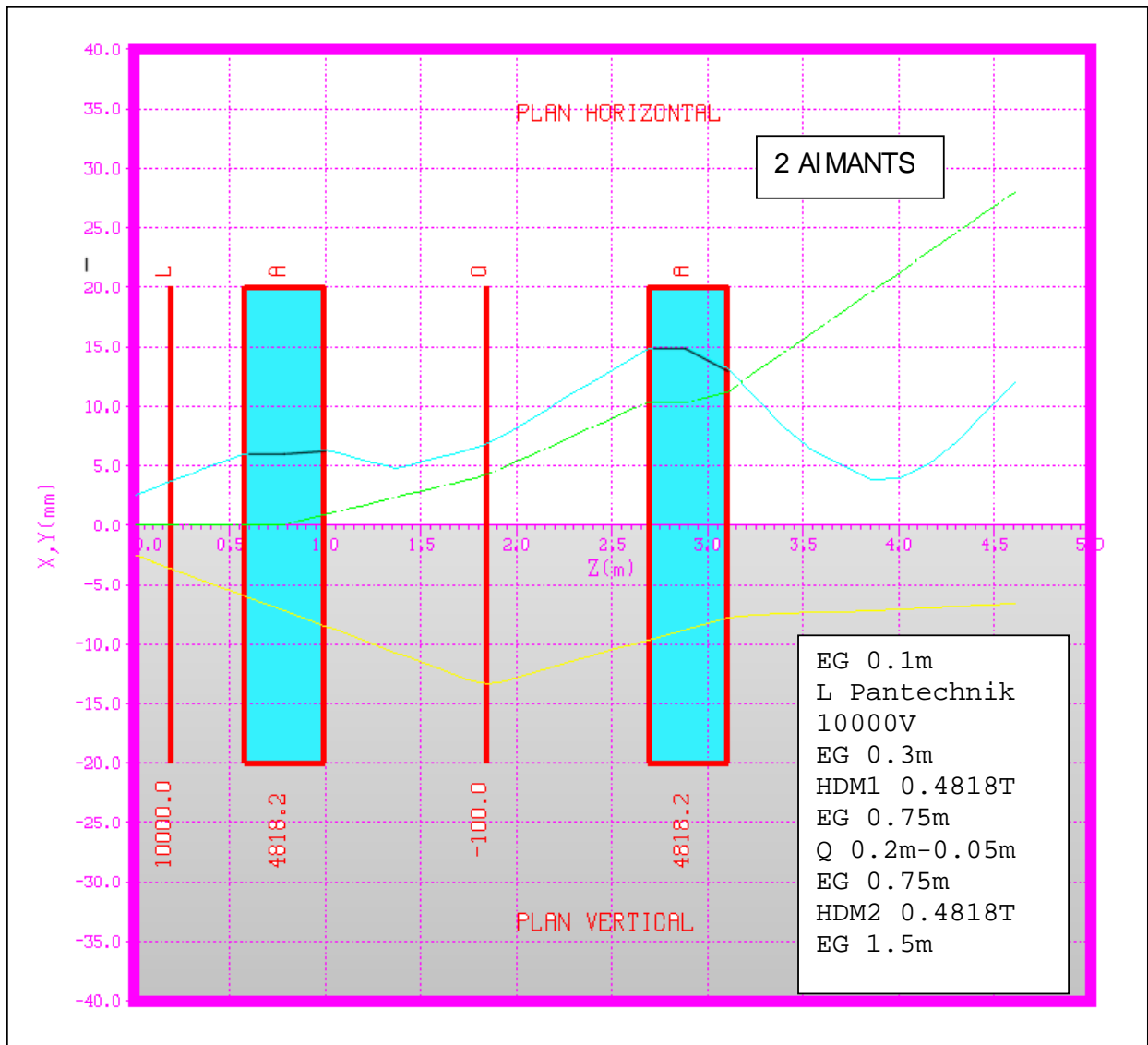
Toute modification légère des dimensions de la lentille « einzel » est sans importance. Elle joue d'ailleurs ici, un rôle secondaire. Le singulet électrostatique a un rayon de gorge de 5cm et une longueur de 25cm. Il pourrait être remplacé par un quadropole magnétique de même k.

b) La solution ASTON comprend un déviateur électrostatique cylindrique de 0.5m de long déviant de 57° avant le singulet en lieu et place de la lentille unipotentielle. La résolution dépasse 250 à condition de placer une fente pour limiter l'excursion radiale dans l'aimant ce qui introduit une perte de faisceau.

c) La solution à 2 aimants avec une lentille unipotentielle en tête et un singulet entre les 2 aimants permet d'obtenir une résolution de 250.







2-3-Conclusion.

Ces solutions amènent à utiliser des tensions d'accélération très basses pour des masses 10000 (quelques centaines de volts).

Les encombrements sont compatibles avec le local prévu.

Il apparaît clairement qu'un système à haute résolution pour les agrégats imposerait d'avoir une source dans une plate-forme à 100kV et des aimants à plus forte rigidité.

Par ailleurs, le choix d'une source ECR pour faire des agrégats multichargés n'est pas adapté. Il faudrait avoir un ioniseur beaucoup plus long du type ioniseur de jets supersoniques pour avoir un rendement de capture raisonnable.

REFERENCES

- 1- J.ARIANER et al. Proceedings of the 2nd EBI S Workshop (1982). Edité par l'IPN.
- 2- R.GELLER. ECRIS & ECR plasmas. Institute of Physics Publishing.
- 3- R.BECKER. Proceedings of the 1st EBI S Workshop (1977). Edité par GSI.
- 4- N.CHAUVIN. Thèse. Rapport ISN 00-76 (2000). Université J.Fourier.
- 5- L.MAUNOURY. Thèse. Rapport GANIL T98-01.
- 6- K.WIESEMANN. IEEE Trans.on Nucl.Sc. NS19-2 (1971).
- 7- J.L.DELCROIX & A.BERS. Physique des plasmas (1994). EDP Sciences.
- 8- K.BOUSSEFIANE-BAUDIN. Thèse. Rapport IPNO T-96-06 (1993).
- 9- W.B.HERRMANNNSFELDT. Rapport SLAC 166 (1973).
- 10-D.A.DAHL. Rapport INEEL-95/0403 (2000). Bechtel BWXT.
- 11-H.WOLLNIK et al. Rapport GSI THD-26 (1984).
- 12-K.L.BROWN et al. Rapport CERN 80-04 (1980).
- 13-J.ARIANER. Rapport RDA/JA/00/T-01 (2000).

Code TCD.FOR

```
C-----
C
C
C      PROGRAMME D'ETUDE DE LA FOCALISATION D'UN FAISCEAU D'AGREGATS
C      PAR UN SYSTEME DE LENTILLE  ELECTROSTATIQUE SIMULEE PAR 2
C      GAPS DONT LE POTENTIEL OBEIT A UNE EXPRESSION
C      ANALYTIQUE, UNE INDUCTION MAGNETIQUE DUE A UN SYSTEME
C      AXISYMETRIQUE ET A UN FILTRE DE WIEN, POUR TRAITER LE
C      PROBLEME SPECIFIQUE DU PROJET TANCREDE.
C      LE TRIEDRE EST ORTHONORME, DE SORTE QUE X EST DANS LE PLAN
C      HORIZONTAL,Y DANS LE PLAN VERTICAL.
C      VERSION DU 01/01/01.
C
C-----
C  DONNEES
C-----
C      DIMENSION U(4),
C      1XP(50),YP(50),XDRAW(1500,50),YDRAW(1500,50),BF(100),
C      2XPLOT(1500),YPLOT(1500),ZPLOT(1500),X(50),Y(50),
C      3AA(4),CC(4),Q(4),CK(4),B(4),AC(2),BC(2)
C      COMMON/BLOC1/ZM,RA,RB,GAP,V1,V2
C      COMMON/BLOC2/BF,NN,DU,ZB
C
C      CHARACTER SYMBOL*3
C      CHARACTER TITRE*50
C
C      NAMELIST/DONNE/KMAX,AMASS,NN,DU,ZB,
C      1DZ,ENERGO,GYMAX,GZMAX
C
C      DIMENSION VIT(100)
C
C-----
C      LE FICHIER DONNEES EST TCD.DAT.
C      LE FICHIER RESULTAT EST TCD.RET.
C-----
C      OPEN(UNIT=8,FILE='TCD.DAT',STATUS='OLD',
C      1ACCESS='SEQUENTIAL',FORM='FORMATTED')
C      OPEN(UNIT=9,FILE='TCD.RET',STATUS='OLD',
C      1ACCESS='SEQUENTIAL',FORM='FORMATTED')
C
C      LOTO=0
C      LS=0
C
C      150 REWIND 8
C
C      READ(8,100)TITRE
C      100 FORMAT(A50)
C      READ(8,DONNE)
C
C      IF (LOTO.GT.0) THEN
C        WRITE(*,*)'Quelle est la masse a considerer?'
C        READ(*,*)AMASS
C      ENDIF
C      READ(8,*)(X(I),XP(I),Y(I),YP(I),I=1,KMAX)
C      READ(8,*)(BF(I),I=1,NN)
C-----
C
```



```

C      GYMAX ET GZMAX SONT LES EXTENSIONS MAXIMALES EN MM DES MOUVEMENTS.
C      LES TRAITS PLEINS SONT POUR LE PLAN VERTICAL DANS LE TRACE.

```

```

C-----
      CALL CHOIX_DEV(IDEV)
      CALL SETDEV(15,16)
      CALL NOBRDR
      CALL PAGE(14.,11.)
      CALL AREA2D(12.,9.)
      CALL HEADIN(TITRE,50,1.5,1)
      CALL XTICKS(5)
      CALL YTICKS(5)
      CALL YAXANG(0.)
      CALL XNAME('Z(mm)$',100)
      CALL YNAME('PL.HORIZ.(TR.PO.)      PL.VERT.(TR.PL.)$',100)
      CALL CROSS
      CALL GRAF(0., 'SCALE',GZMAX,-GYMAX, 'SCALE',GYMAX)
      CALL THKFRM(0.1)
      CALL FRAME
      CALL SETCLR('YELLOW')
      CALL DASH
      CALL GRID(1,1)
      CALL RESET('DASH')
      CALL SETCLR('GREEN')
      CALL ANGLE(90.)
      CALL THKCRV(0.05)

```

```

C-----
C      DONNEES INITIALES POUR L'INTEGRATION RUNGE-KUTTA.
C-----

```

```

      AA(1)=0.5
      AA(2)=0.29289322
      AA(3)=1.70710678
      AA(4)=0.16666667
      B(1)=2.
      B(2)=1.
      B(3)=1.
      B(4)=2.
      CC(1)=0.5
      CC(2)=AA(2)
      CC(3)=AA(3)
      CC(4)=0.5
      Q(1)=0.
      Q(2)=0.
      Q(3)=0.
      Q(4)=0.
C-----
      ETA=1.759E+11
      QSM=ETA/(1836.*AMASS)

170  DO I=1,KMAX
      VIT(I)=SQRT(2.*QSM*ENERG0)
      ENDDO
      BC(1)=0.5*GYMAX
      BC(2)=-0.5*GYMAX
      WRITE(9,103)
      WRITE(9,107),(I,X(I),XP(I),Y(I),YP(I),I=1,KMAX)
107  FORMAT(/,20X,'I=',I3,5X,'X0=',E9.3,5X,'XP0=',E9.3,5X,'Y0=',
1E9.3,5X,'YP0=',E9.3)
103  FORMAT(45X,'*****',/)
      WRITE(9,103)
      Z=0.0

```

```

L PLOT=1
DO I=1,KMAX
XDRAW(L PLOT,I)=1000.*X(I)
YDRAW(L PLOT,I)=1000.*Y(I)
ENDDO
ZPLOT(L PLOT)=1000.*Z
L PLOT=L PLOT+1
16 READ(8,102)SYMBOL
   READ(8,*)KODE
102 FORMAT(A3)
   WRITE(9,103)
   WRITE(9,*)SYMBOL,KODE
C-----
C      SYMBOL EST UNE CARACTERISTIQUE ALPHABETIQUE DE 3 LETTRES DU
C      SYSTEME RENCONTRE. KODE EST UN ENTIER EGAL A 1 POUR UN
C      ESPACE LIBRE, 2 POUR UNE LENTILLE, 3 POUR UN FILTRE DE WIEN,
C      0 POUR TERMINER.
C-----
      IF(KODE.EQ.0)GO TO 203
C
C      *****
C      ESPACE DE GLISSEMENT
C      *****
      IF(KODE.EQ.1) THEN
        READ (8,*) ZL
        ZMAX=Z+ZL
        CALL MAGN(Z,BZ,D1B)
11      DO I=1,KMAX
          U(1)=X(I)
          U(2)=XP(I)
          U(3)=Y(I)
          U(4)=YP(I)
          DO L=1,4
            BX=-U(1)*D1B/2.
            BY=-U(3)*D1B/2.
            ZPOIN=VIT(i)/SQRT(1.+U(2)**2+U(4)**2)
            PARA01=QSM/ZPOIN
            PARA02=PARA01/ZPOIN
            CK(1)=DZ*U(2)
            TERM1X=PARA01*U(2)*U(4)*BX
            TERM2X=PARA01*(1.+U(2)**2)*BY
            TERM3X=PARA01*U(4)*BZ
            CK(2)=DZ*(TERM1X-TERM2X+TERM3X)
            CK(3)=DZ*U(4)
            TERM1Y=PARA01*(1.+U(4)**2)*BX
            TERM2Y=PARA01*U(2)*U(4)*BY
            TERM3Y=PARA01*U(2)*BZ
            CK(4)=DZ*(TERM1Y-TERM2Y-TERM3Y)
            DO M=1,4
              TT=AA(L)*(CK(M)-B(L)*Q(M))
              U(M)=U(M)+TT
              Q(M)=Q(M)+3.*TT-CC(L)*CK(M)
            ENDDO
          ENDDO
          XDRAW(L PLOT,I)=1000.*U(1)
          YDRAW(L PLOT,I)=1000.*U(3)
          X(I)=U(1)
          XP(I)=U(2)
          Y(I)=U(3)
          YP(I)=U(4)
        ENDDO
        ZPLOT(L PLOT)=1000.*Z

```

```
WRITE(9,*) 'V=' , V, 'B=' , BZ, 'Z=' , ZPLOT(LPLOT)
Z=Z+DZ
LPLOT=LPLOT+1
CALL MAGN(Z,BZ,D1B)
IF(Z-ZMAX)11,11,16
```

C
C
C

GAP ELECTROSTATIQUE

```
ELSE IF(KODE.EQ.2) THEN
  READ(8,*) ZL,ZM,RA,RB,GAP,V1,V2
```

```

C-----
C      ZF EST L'ABSCISSE DE FIN D'ACTION DU DISPOSITIF.
C      ZM EST LE MILIEU DE L'INTERVALLE ACTIF.
C      RA EST LE RAYON DE L'ELECTRODE D'ENTREE, RB CELUI DE LA
C      SORTIE. GAP EST L'INTERVALLE ENTRE ELECTRODES.
C-----

```

```

ZMAX=Z+ZL
ZINI=Z
ZREF=Z-ZINI
AC(1)=(Z+ZM)*1000.
AC(2)=AC(1)
      CALL CURVE(AC,BC,2,0)
      CALL RLMESS(SYMBOL,3,AC(1),0.52*GYMAX)
      CALL RLREAL(V1,1,AC(1),0.65*GYMAX)
      CALL RLREAL(V2,1,AC(1),-0.7*GYMAX)
CALL POTEN(ZREF,V,D1V,D2V)
CALL MAGN(Z,BZ,D1B)
EZ=-D1V
ENERG=ENERG0-V
DO I=1,KMAX
  U(1)=X(I)
  U(2)=XP(I)
  U(3)=Y(I)
  U(4)=YP(I)
DO L=1,4
  VITI=SQRT(2.*QSM*(ENERG-(U(1)**2+U(3)**2)*D2V/4.))
  CORVIT=SQRT(1.+U(2)**2+U(4)**2)
  ZPOIN=VITI/CORVIT
  EX=U(1)*D2V/2.
  EY=U(3)*D2V/2.
  BX=U(1)*D1B/2.
  BY=U(3)*D1B/2.
  PARA01=QSM/ZPOIN
  PARA02=PARA01/ZPOIN
  CK(1)=DZ*U(2)
  TERM1X=PARA01*U(2)*U(4)*BX
  TERM2X=PARA01*(1.+U(2)**2)*BY
  TERM3X=PARA01*U(4)*BZ
  TERM4X=PARA02*(EX-U(2)*EZ)
  CK(2)=DZ*(TERM1X-TERM2X+TERM3X+TERM4X)
  CK(3)=DZ*U(4)
  TERM1Y=PARA01*(1.+U(4)**2)*BX
  TERM2Y=PARA01*U(2)*U(4)*BY
  TERM3Y=PARA01*U(2)*BZ
  TERM4Y=PARA02*(EY-U(4)*EZ)

```

```

      CK(4)=DZ*(TERM1Y-TERM2Y-TERM3Y+TERM4Y)
      DO M=1,4
        TT=AA(L)*(CK(M)-B(L)*Q(M))
        U(M)=U(M)+TT
        IF(U(M).GT.1.4)GO TO 203
        Q(M)=Q(M)+3.*TT-CC(L)*CK(M)
      ENDDO
      ENDDO
      XDRAW(LPLOT,I)=1000.*U(1)
      YDRAW(LPLOT,I)=1000.*U(3)
      X(I)=U(1)
      XP(I)=U(2)
      Y(I)=U(3)
      YP(I)=U(4)
      ENDDO
      ZPLOT(LPLOT)=1000.*Z
      WRITE(9,*)'V=' ,V,'B=' ,BZ,'Z=' ,ZPLOT(LPLOT)
      Z=Z+DZ
      ZREF=Z-ZINI
      LPLOT=LPLOT+1
      CALL POTEN(ZREF,V,D1V,D2V)
      EZ=-D1V
      ENERG=ENERG0-V
      CALL MAGN(Z,BZ,D1B)
      IF(Z-ZMAX)12,12,16

C
C
C
      *****
      FILTRE DE WIEN
      *****

ELSE IF(KODE.EQ.3) THEN
  READ(8,*) ZL,BY
  WRITE(9,*) BY
  AC(1)=(Z+ZL/2.)*1000.
  AC(2)=AC(1)

      CALL CURVE(AC,BC,2,0)
      CALL ANGLE(0.)
      CALL RLMESS('MASSE=' ,6,8.*GZMAX/75.,4.*GYMAX/5.)
      CALL RLREAL(AMASS,0,13.*GZMAX/75.,4.*GYMAX/5.)
      CALL ANGLE(90.)
      CALL RLMESS(SYMBOL,3,AC(1),0.52*GYMAX)
      CALL RLREAL(BY,2,AC(1),0.65*GYMAX)

  IF (LOTO.EQ.0) THEN
    EXFW=VIT(1)*BY
    LOTO=5
  ENDIF
  ZMAX=Z+ZL
13 DO I=1,KMAX
    U(1)=X(I)
    U(2)=XP(I)
    U(3)=Y(I)
    U(4)=YP(I)

    X0=U(1)
    XP0=U(2)
    YP0=U(4)

```

```

DO L=1,4
  ZPOIN=VIT(I)/SQRT(1.+U(2)**2+U(4)**2)
  PARA01=QSM/ZPOIN
  PARA02=PARA01/ZPOIN
  CK(1)=DZ*U(2)
  TERM5X=PARA02*EXFW-PARA02*BY*ZPOIN
  TERM2X=PARA02*BY*(ZPOIN*U(2)**2+QSM*U(1)*BY)
  CK(2)=DZ*(TERM5X-TERM2X)
  CK(3)=DZ*U(4)
  TERM2Y=PARA01*U(2)*U(4)*BY
  CK(4)=DZ*(-TERM2Y)
DO M=1,4
  TT=AA(L)*(CK(M)-B(L)*Q(M))
  U(M)=U(M)+TT
  IF(U(M).GT.1.4)GO TO 203
  Q(M)=Q(M)+3.*TT-CC(L)*CK(M)
ENDDO
ENDDO

XDRAW(LPLOT,I)=1000.*U(1)
YDRAW(LPLOT,I)=1000.*U(3)
X(I)=U(1)
XP(I)=U(2)
Y(I)=U(3)
YP(I)=U(4)
ZPOIN=ZPOIN+QSM*BY*(U(1)-X0)
VIT(I)=ZPOIN*SQRT(1+U(2)**2+U(4)**2)
ENDDO
ZPLOT(LPLOT)=1000.*Z
Z=Z+DZ
WRITE(9,*)TERM2X,TERM2Y,TERM4X
LPLOT=LPLOT+1
IF(Z-ZMAX)13,13,16
ENDIF

203  LRTMX=LPLOT-1
      WRITE(9,107),(I,X(I),XP(I),Y(I),YP(I),I=1,KMAX)
      DO 204 I=1,KMAX
      DO 205 J=1,LRTMX
        XPLOT(J)=XDRAW(J,I)
205   YPLOT(J)=-YDRAW(J,I)
          CALL SETCLR('RED')
          CALL RESET('THKCRV')
          CALL CURVE(ZPLOT,YPLOT,LRTMX,0)
          CALL SETCLR('BLUE')
          CALL DOT
          CALL CURVE(ZPLOT,XPLOT,LRTMX,0)
          CALL RESET('DOT')
204   CONTINUE
          CALL ENDPL(0)
          CALL DONEPL

      LS=LS+1
      IF (LS.LT.2) GO TO 150

      STOP
      END

```

```

C-----
C
C   PROGRAMME DE CALCUL DE LA REPARTITION DE POTENTIEL DANS UN
C   GAP DE LONGUEUR GAP ENTRE 2 TUBES, LE PREMIER DE RAYON RA,
C   LE SECOND DE RAYON RB, AUX POTENTIELS V1 ET V2. ZM EST
C   L'ABSCISSE RELATIVE DU MILIEU DU GAP, ZF L'ABSCISSE RELATIVE
C   DE LA FIN DE LA ZONE D'ACTION CONSIDEREE.
C-----

```

```

      SUBROUTINE POTEN(Z,V,D1,D2)

      COMMON/BLOC1/ZM,RA,RB,GAP,V1,V2
      OMEGA=1.318
      ZREF=Z-ZM
      RM=(RA+RB)/2.
      PARAM1=(V1+V2)/2.
      PARAM2=(V2-V1)*RM/(2.*OMEGA*GAP)
      PARAM3=(V2-V1)/(2.*GAP)
      PARAM4=PARAM3*OMEGA/RM
      ARGP=OMEGA*(ZREF+GAP/2.)/RM
      ARGM=OMEGA*(ZREF-GAP/2.)/RM
      CP=COSH(ARGP)
      CM=COSH(ARGM)
      THP=TANH(ARGP)
      THM=TANH(ARGM)
      V=PARAM1+PARAM2*ALOG(CP/CM)
      D1=PARAM3*(THP-THM)
      D2=PARAM4*(THM**2-THP**2)
      RETURN
      END

```

```

C-----
C   CE SOUS-PROGRAMME INTERPOLE LES VALEURS DES CHAMPS
C   ET CALCULE LES DERIVEES
C-----

```

```

      SUBROUTINE MAGN(Z,B,D1B)

      DIMENSION BF(100)
      COMMON/BLOC2/BF,NN,DU,ZB

14  ZZREF=Z-ZB
    IF (ZZREF.LE.0.)GO TO 400
297 ZLIM=ZB+(NN-1)*DU
    IF(ZZREF.GT.ZLIM) THEN
      B=BF(NN)
      D1B=0.
      RETURN
    ELSE
      CONTINUE
    ENDIF
298 N=INT(ZZREF/DU)+1
299 IF(N-1) 301,300,301
300 N1=N
    N2=N+1
    N3=N+2
    N4=N+3
    N5=N+4
    U=ZZREF/DU

```

```

      GO TO 307
301 IF(N-2) 299,302,303
302 N1=N-1
      N2=N
      N3=N+1
      N4=N+2
      N5=N+3
      U=ZZREF/DU
      GO TO 307
303 IF(N-3) 299,304,304
304 N1=N-2
      N2=N-1
      N3=N
      N4=N+1
      N5=N+2
      U=ZZREF/DU-FLOAT(N-3)

```

```

C-----
C      CALCUL DES COEFFICIENTS DE NEWTON-GREGORY.
C-----

```

```

307 REMP1=U
      REMP2=REMP1*(U-1.)/2.
      REMP3=REMP2*(U-2.)/3.
      REMP4=REMP3*(U-3.)/4.
      SH1= 1.-REMP1+REMP2-REMP3+REMP4
      SH2= REMP1-2.*REMP2+3.*REMP3-4.*REMP4
      SH3= REMP2-3.*REMP3+6.*REMP4
      SH4= REMP3-4.*REMP4
      SEMP2=(2.*U-1.)/2.
      SEMP3=(3.*U**2-6.*U+2.)/6.
      SEMP4=(4.*U**3-18.*U**2+22.*U-6.)/24.
      CH1= -1.+SEMP2-SEMP3+SEMP4
      CH2= 1.-2.*SEMP2+3.*SEMP3-4.*SEMP4
      CH3= SEMP2-3.*SEMP3+6.*SEMP4
      CH4= SEMP3-4.*SEMP4

```

```

C-----
C      CALCUL DU POTENTIEL ET DES CHAMPS SUR L'AXE
C-----

```

```

      YH1=SH1*BF(N1)
      YH2=SH2*BF(N2)
      YH3=SH3*BF(N3)
      YH4=SH4*BF(N4)
      YH5=REMP4*BF(N5)
      B=YH1+YH2+YH3+YH4+YH5
      ZH1=CH1*BF(N1)
      ZH2=CH2*BF(N2)
      ZH3=CH3*BF(N3)
      ZH4=CH4*BF(N4)
      ZH5=SEMP4*BF(N5)
      D1B=(ZH1+ZH2+ZH3+ZH4+ZH5)/DU
      RETURN
400 B=0.
      D1B=0.
      RETURN
      END

```

```

Injection LMIS-ECR TANCREDE
$DONNE
KMAX=40,DZ=1.E-03,ENERG0=20000.,GYMAX=25.,GZMAX=800.,
AMASS=240,ZB=0.663,DU=0.005,NN=25
$END
0.0001      0.005  0.0  0.0
0.0002      0.010  0.0  0.0
0.0003      0.015  0.0  0.0
0.0004      0.020  0.0  0.0
0.0005      0.025  0.0  0.0
0.0006      0.030  0.0  0.0
0.0007      0.035  0.0  0.0
0.0008      0.040  0.0  0.0
0.0009      0.045  0.0  0.0
0.001       0.050  0.0  0.0
-0.0001     -0.005  0.0  0.0
-0.0002     -0.010  0.0  0.0
-0.0003     -0.015  0.0  0.0
-0.0004     -0.020  0.0  0.0
-0.0005     -0.025  0.0  0.0
-0.0006     -0.030  0.0  0.0
-0.0007     -0.035  0.0  0.0
-0.0008     -0.040  0.0  0.0
-0.0009     -0.045  0.0  0.0
-0.001      -0.050  0.0  0.0
0.0  0.0  0.0001      0.005
0.0  0.0  0.0002      0.010
0.0  0.0  0.0003      0.015
0.0  0.0  0.0004      0.020
0.0  0.0  0.0005      0.025
0.0  0.0  0.0006      0.030
0.0  0.0  0.0007      0.035
0.0  0.0  0.0008      0.040
0.0  0.0  0.0009      0.045
0.0  0.0  0.001       0.050
0.0  0.0  -0.0001     -0.005
0.0  0.0  -0.0002     -0.010
0.0  0.0  -0.0003     -0.015
0.0  0.0  -0.0004     -0.020
0.0  0.0  -0.0005     -0.025
0.0  0.0  -0.0006     -0.030
0.0  0.0  -0.0007     -0.035
0.0  0.0  -0.0008     -0.040
0.0  0.0  -0.0009     -0.045
0.0  0.0  -0.001      -0.050
0.00
0.005
0.02
0.14
0.265
0.364
0.467
0.52
0.534
0.521
0.47
0.424
0.379
0.355
0.333
0.331

```



```

0.338
0.358
0.39
0.409
0.439
0.446
0.402
0.32
0.171
LA
2
0.015 0.005 0.001 0.0043 0.006 0.0 8000.
LB
2
0.015 0.006 0.0024 0.0024 0.004 8000. 0.0
LC
2
0.015 0.008 0.0024 0.0024 0.004 0.0 -13700.
LD
2
0.025 0.01 0.0043 0.0043 0.006 -13700. 0.0
DR1
1
0.07
FW
3
0.125 0.6
DR2
1
0.055
L1
2
0.1 0.052 0.025 0.025 0.005 0.0 12250.
L2
2
0.1 0.041 0.025 0.025 0.005 12250. 0.0
DR3
1
0.17
DEC
2
0.075 0.017 0.005 0.016 0.001 0.0 19995.
FIN
0

```

Code TANC.FOR

```

C      |          ***** PROGRAMME TANC *****
C      |
C      | CE PROGRAMME ETUDIE LA FOCALISATION D'UN FAISCEAU D'IONS
C      | PAR SON EMITTANCE DANS UN SYSTEME DE QUADRIPOLES, LENTILLES ELEC-
C      | -TROSTATIQUES, TUBE ACCELERATEUR, ELEMENT A SECTEUR
C      | MAGNETIQUE, DEVIATEURS ELECTROSTATIQUES
C      | VERSION REVISEE D'ISOLANAL EN COULEUR AVEC DISSPLA DU 01/12/99.
C      | MODIFICATION D'APPEL DE LA VISU POUR UN TERMINAL X.
C      |
C      | -----
C      |
C      | DIMENSION X(100),XP(100),Y(100),YP(100),U(4),VF(100),EC(2),
C      | 1XPLOT(2000),YPLOT(2000),ZPLOT(2000),AC(2),BC(2),CC(2),DC(2),
C      | 2AA(4),B(4),C(4),CK(6),Q(6),DELTVA(100),XRES(2000)
C      | REAL*8 X,Y,XP,YP,U,AA,B,C,Q,CK
C      | COMMON/BLOC1/VF,DV
C      | NAMELIST/DONNE/DZ,VA,KMAX,NSTEP,YMAXS,XMAXS,AMASS
C      | CHARACTER*40 TITRE
C
C      | -----
C      | DONNEES RUNGE-KUTTA.
C      | METHODE D'INTEGRATION CLASSIQUE DONT LA PROGRAMMATION EST
C      | TIREE DE TRIWHEEL, CODE MSU.
C      | -----
C      |
C      | AA(1)=0.5
C      | AA(2)=0.29289322
C      | AA(3)=1.70710678
C      | AA(4)=0.16666667
C      | B(1)=2.
C      | B(2)=1.
C      | B(3)=1.
C      | B(4)=2.
C      | C(1)=0.5
C      | C(2)=AA(2)
C      | C(3)=AA(3)
C      | C(4)=0.5
C      | Q(1)=0.
C      | Q(2)=0.
C      | Q(3)=0.
C      | Q(4)=0.
C      | Q(5)=0.
C      | Q(6)=0.
C      | -----
C      |
C      | LE FICHIER DONNEES EST APPELE TANC.DAT
C      | LE FICHIER RETOUR EST TANC.RET
C      | LE PROGRAMME EST COMPILE ET LINKE PAR LA PROCEDURE USE DISSPLA
C      | PUIS VOIR_DISS, ON REPOND TANC. PUIS ON DECLARE SON TYPE
C      | DE CONSOLE, ON A LES RESULTATS GRAPHIQUES SUR L'ECRAN. ON
C      | PEUT AUSSI DEMANDER UN METAFICHIER QUE L'ON PEUT IMPRIMER
C      | DIRECTEMENT EN NOIR ET BLANC OU EN COULEUR EN SELECTIONNANT
C      | SON TYPE D'IMPRIMANTE.
C      | -----

```

```

OPEN(UNIT=8,FILE='TANC.DAT',STATUS='OLD',
1ACCESS='SEQUENTIAL',FORM='FORMATTED')
OPEN(UNIT=9,FILE='TANC.RET',STATUS='OLD',
1ACCESS='SEQUENTIAL',FORM='FORMATTED')
READ(8,998)TITRE
998  FORMAT(A40)
READ(8,DONNE)
READ(8,*),(X(I),XP(I),Y(I),YP(I),DELTVA(I),I=1,KMAX)
C-----
C      KMAX EST TOUJOURS IMPAIR. LA DERNIERE PARTICULE EST AFFECTEE
C      DU DELTA VA CORRESPONDANT A L'ECART DE MASSE QUE L'ON VEUT
C      RESOUDRE AVEC L'AIMANT.
C      LES (KMAX-1)/2 PREMIERES PARTICULES SONT DANS LE PLAN X'OX,
C      LES (KMAX-1)/2 DERNIERES PARTICULES SONT DANS LE PLAN Y'OY,
C      XP ET YP SONT EN RAD, DELTVA EST L'ECART ENERGETIQUE EN EV
C      PAR RAPPORT A VA.
C-----
C      DONNEES DE CONFIGURATION DE DISSPLA
C      ++++++
C      YMAXS EST,EN MM,L'ORDONNEE MAX EN X,Y SUR LE DESSIN,
C      XMAXS EST,EN M, L'ABSCISSE MAX EN Z SUR LE DESSIN.
C-----
C      CALL CHOIX_DEV(IDEV)
C      CALL SETDEV(15,16)
C      CALL NOBRDR
C      CALL PAGE(11.,11.)
C      CALL AREA2D(9.,9.)
C      CALL XNAME('Z(m)$',100)
C      CALL YAXANG(0.)
C      CALL YNAME('X,Y(mm)$',100)
C      CALL CROSS
C      CALL SETCLR('GREEN')
C      CALL XTICKS(10)
C      CALL YTICKS(5)
C      CALL GRAF(0.,'SCALE',XMAXS,-YMAXS,'SCALE',YMAXS)
C      CALL DOT
C      CALL GRID(1,1)
C      CALL THKFRM(0.1)
C      CALL FRAME
C      CALL RESET('DOT')
C      CALL SETCLR('CYAN')
C      CALL THKCRV(0.05)
C      CALL ANGLE(90.)
C
C
C      BC(1)=0.5*YMAXS
C      BC(2)=-0.5*YMAXS
C      DC(1)=BC(1)
C      DC(2)=BC(1)
C      EC(1)=BC(2)
C      EC(2)=BC(2)
C      LPRT=1
100  FORMAT( )
1000 FORMAT(35X,'*****')
WRITE(9,1000)
WRITE(9,1002)KMAX
WRITE(9,1000)
1002 FORMAT(/,15X,'KMAX=',I4,/)
Z=0.
VAM=0.
NIJ=(KMAX-1)/2

```

```

1  READ(8,*)ISYST
   KPRINT=9
C-----
C    LE CODE 1 (ISYST=1) DEFINIT UN ESPACE LIBRE
C    LE CODE 2 (ISYST=2) DEFINIT UN QUADRIPOLE
C    LE CODE 3 (ISYST=3) DEFINIT UNE LENTILLE ELECTROSTATIQUE
C    LE CODE 4 (ISYST=4) DEFINIT UN TUBE ACCELERATEUR.
C    LE CODE 5 (ISYST=5) DEFINIT UN SECTEUR MAGNETIQUE.
C    LE CODE 6 (ISYST=6) DEFINIT UN DEVIATEUR ELECTROSTATIQUE.
C    ON PEUT MULTIPLIER LES CODES A L'INFINI, C'EST LE PRINCIPE DE
C    "TRANSPORT".
C-----
      WRITE(9,1003)(I,X(I),XP(I),Y(I),YP(I),I=1,KMAX)
      WRITE(9,1000)
1003  FORMAT(4X,'I=',I3,3X,'X=',F8.5,4X,'XP=',F8.5,4X,'Y=',F8.5,4X,
1      'YP=',F8.5,4X)
      WRITE(9,1000)
      IF (ISYST.EQ.1) GO TO 2
      IF (ISYST.EQ.2) GO TO 3
      IF (ISYST.EQ.3) GO TO 5
      IF (ISYST.EQ.4) GO TO 4
      IF (ISYST.EQ.5) GO TO 6
      IF (ISYST.EQ.6) GO TO 7
      IF (ISYST.EQ.999) GO TO 999
C-----
C          ESPACE LIBRE DE LONGUEUR ZL.ON FAIT UNE APPLICATION
C          LINEAIRE.
C-----
2  READ(8,*)ZL
   WRITE(9,1023)ZL
1023  FORMAT (/ ,3X,'ESPACE LIBRE*****', 'L=',E9.3,3X,/)
      WRITE(9,1000)
      DZL=ZL/NSTEP
      DO 57 KJ=1,NSTEP
      DO J=1,KMAX
      X(J)=X(J)+DZL*XP(J)
      Y(J)=Y(J)+DZL*YP(J)
      END DO
      NEX=NIJ+1
      XMAX=ABS(X(1))
      YMAX=ABS(Y(NEX))
      DO K=1,NIJ
      IF(ABS(X(K)).GT.XMAX) XMAX=ABS(X(K))
      END DO
      DO K=NEX,KMAX-1
      IF(ABS(Y(K)).GT.YMAX) YMAX=ABS(Y(K))
      END DO
      Z=Z+DZL
      ZZ=1000.*Z
      XXMAX=1000.*XMAX
      YYMAX=1000.*YMAX
      IF(XXMAX.GT.YMAXS.OR.YYMAX.GT.YMAXS)GO TO 999
      XPLOT(LPRT)=XXMAX
      YPLOT(LPRT)=YYMAX
      XRES(LPRT)=-1000.*X(KMAX)
      ZPLOT(LPRT)=Z
      LPRT=LPRT+1
      WRITE(9,1025)ZZ,XXMAX,YYMAX
1025  FORMAT(3X,'Z=',F7.1,3X,'XMAX=',F5.1,3X,'YMAX=',F5.1)
57  CONTINUE

```

```

      GO TO 1
C-----
C      QUADRUPOLE DE LONGUEUR ZL,DE TENSION SYMETRIQUE VE,DE RAYON
C      DE GORGE RHO, FOCALISANT EN X SI VE EST DE SIGNE +.
C      ON EXPRIME LE CHAMP RADIAL A PARTIR D'UNE EXPRESSION CLASSIQUE.
C      ON INTEGRE POINT PAR POINT.
C-----
      3  READ(8,*)VE,RHO,ZL

      ZMAX=Z+ZL
      AC(1)=Z+ZL/2.
      AC(2)=AC(1)
           CALL CURVE(AC,BC,2,0)
           CALL RLMESS('Q',1,AC(1),0.52*YMAXS)
           CALL RLREAL(VE,1,AC(1),-0.7*YMAXS)
      CT=1./(VA*RHO**2)
      CTE=VE*CT
      RACCTE=SQRT(ABS(CTE))
      WRITE(9,1024)RACCTE
1024  FORMAT(3X,'QUADRIPOLE*****',3X,'K=',E12.5,/)
      WRITE(9,1030)VE,RHO,ZL
1030  FORMAT(3X,'VE=',E9.3,3X,'RHO=',F5.3,3X,'L=',E9.3,/)
      WRITE(9,1000)
      CEX=-CTE
      CEY=CTE
      CEZ=0.

C-----
C      INTEGRATION PAR RUNGE-KUTTA5
C-----
      56  DO 40 J=1,KMAX
           U(1)=X(J)
           U(2)=XP(J)
           U(3)=Y(J)
           U(4)=YP(J)
           COR=(1.+DELTVA(J)/VA)*(1.+U(2)**2+U(4)**2)
           CORV=0.0
           IF(ISYST.EQ.6) CORV=DELTVA(J)/(VA*RAYO**2)
           DO 201 L=1,4
               CK(1)=DZ*U(2)
C      LES TERMES EN CEX,CEY ET CEZ DOIVENT ETRE EXPRIMES AVEC
C      LA PLUS GRANDE CIRCONSCRIPTION.
           CK(2)=DZ*((CEX*U(1)-CEZ*U(2))*COR+CORV)
           CK(3)=DZ*U(4)
           CK(4)=DZ*(CEY*U(3)-CEZ*U(4))*COR
           DO M=1,4
               TT=AA(L)*(CK(M)-B(L)*Q(M))
               U(M)=U(M)+TT
               Q(M)=Q(M)+3.*TT-C(L)*CK(M)
           END DO
201  CONTINUE
      13  X(J)=U(1)
           XP(J)=U(2)
           Y(J)=U(3)
           YP(J)=U(4)
      40  CONTINUE
           XMAX=ABS(X(1))
           YMAX=ABS(Y(NEX))
           DO K=1,NIJ
               IF(ABS(X(K)).GT.XMAX) XMAX=ABS(X(K))

```

```

END DO
DO K=NEX,KMAX-1
IF (ABS(Y(K)).GT.YMAX) YMAX=ABS(Y(K))
END DO
KPRINT=KPRINT+1
IF (MOD(KPRINT,10).NE.0) GO TO 58
ZZ=1000.*Z
XXMAX=1000.*XMAX
YYMAX=1000.*YMAX
IF (XXMAX.GE.YMAXS.OR.YYMAX.GE.YMAXS) GO TO 999
C-----
C      LES DONNEES SONT EN MKSA, MAIS LES IMPRESSIONS ET DESSINS
C      SONT FAITS AVEC DES DIMENSIONS TRANSVERSES EN MM.
C-----
      XPLOT(LPRT)=XXMAX
      YPLOT(LPRT)=YYMAX
      XRES(LPRT)=-1000.*X(KMAX)
      ZPLOT(LPRT)=Z
      LPRT=LPRT+1
      WRITE(9,1026) ZZ,XXMAX,YYMAX
1026  FORMAT(3X,'Z=',F7.1,3X,'XMAX=',F5.1,3X,'YMAX=',F5.1)
      58  IF (Z.GT.ZMAX2.AND.ISYST.EQ.4) THEN
          VA=VFIN
          AC(1)=Z
          AC(2)=Z
          CALL CURVE(AC,BC,2,0)
          GO TO 1
          ELSE
          IF (Z.GT.ZMAX.AND.ISYST.NE.4) GO TO 1
          ENDIF
          IF (ISYST.EQ.3) THEN
          Z=Z+0.001
          ELSE
          Z=Z+DZ
          ENDIF
          ZZREF=Z-ZREF
          IF (ISYST.EQ.3) GO TO 81
          IF (ISYST.EQ.4) GO TO 83
          GO TO 56
C-----
C      TUBE ACCELERATEUR A GRADIENT CONSTANT. ON CONSIDERE DE FACON
C      SIMPLISTE QUE LA REPARTITION DE POTENTIEL EST LINEAIRE.
C-----
      4  READ(8,*)VFIN,TUBLON
          ZREF=Z
          ZZREF=0.
          ZMAX2=Z+TUBLON
          AC(1)=Z
          AC(2)=Z
          CALL CURVE(AC,BC,2,0)
          CALL RLMESS('TA',2,Z+0.5*TUBLON,0.52*YMAXS)
          CALL RLREAL(VFIN,1,Z+0.5*TUBLON,-0.7*YMAXS)
          CHAZ=(VFIN-VA)/TUBLON
          WRITE(9,1027)VFIN,TUBLON
1027  FORMAT(/,3X,'TUBE ACCELERATEUR*****',3X,'ENERGIE FINALE='
1,F8.1,3X,'LONGUEUR=',F7.3,/)
          WRITE(9,1000)
      83  VAM=VA+CHAZ*ZZREF
          CEX=0.

```

```

CEY=0.
CEZ=CHAZ/(2.*VAM)
GO TO 56

```

```

C-----
C      LENTILLE ELECTROSTATIQUE SIMPLE POLARISEE A VLENT, LES CHAMPS
C      SONT DEDUITS DE SPACHA A PARTIR D'UNE CARTE DE POTENTIELS
C      NORMALISES A 100 SUR L'AXE,COMPRENANT NN VALEURS ESPACEES
C      DE DV METRES.
C-----
5      READ(8,*)VLENT,DV,N
      READ(8,*)(VF(I),I=1,N)
      DO I=1,N
      VF(I)=VF(I)/100.
      END DO
C      DANS LE CAS DE LA LENTILLE "EINZEL" ON SYMETRISE LA CARTE
C      DE POTENTIEL ENTREE POUR UNE MOITIE
      NN=2*N-1
      DO I=1,N-1
      VF(N+I)=VF(N-I)
      END DO
      ZL=(NN-1)*DV
      ZMAX=Z+ZL
      DZ=1.E-03
      AC(1)=Z+ZL/2.
      AC(2)=Z+ZL/2.

      CALL CURVE(AC,BC,2,0)
      CALL RLMESS('L',1,AC(1),0.52*YMAXS)
      CALL RLREAL(VLENT,1,AC(1),-0.75*YMAXS)
      ZMAX2=ZMAX+0.01
C      ASTUCE VASEUSE POUR FACILITER L'AIGUILLAGE 58
      ZZL=1000.*ZL
      WRITE(9,1029)VLENT,ZZL
1029  FORMAT(/,3X,'LENTILLE ELECTR. *****',3X,'POLAR. CENT.=' ,
1F7.1,3X,'LONGUEUR=' ,F7.1,/)
      WRITE(9,1000)
      ZREF=Z
      ZTART1=3.*DV
      ZTART2=(NN-1)*DV
      ZZREF=0.
81     CALL CHELE(VOZ,D1VOZ,D2VOZ,ZZREF)
      IF(ZZREF.LT.ZTART1.OR.ZZREF.GT.ZTART2) THEN
      V=VA
      CEX=0.
      CEY=0.
      CEZ=0.
      GO TO 56
      ELSE
      DDPLEN=VA-VLENT
      D1V=DDPLEN*D1VOZ
      D2V=DDPLEN*D2VOZ
      VAM=VA-VOZ*DDPLEN
      CEX=D2V/(4.*VAM)
      CEY=CEX
      CEZ=-D1V/(2.*VAM)
      GO TO 56
      ENDIF

```

```

C-----
C      FOCALISATION D'AIMANT AMENANT UNE DEVIATION PHI RD
C      PAR UNE INDUCTION BOZ SUR UNE MASSE AMASS.
C      LA MATRICE PRINCIPALE AGIT AU MILIEU DE L'AIMANT. LES MATRICES DES
C      ANGLES DE POLES JOUENT EN LEUR LIEU. RAPPELONS QUE BET1 ET BET2
C      SONT COMPTES + SI LES NORMALES AUX POLES SONT EXTERIEURES/CENTRE
C      DE COURBURE.
C-----
6      READ(8,*)PHI,POLE,BETENT,BETSOR
      TRARAD=3.14159/180.
      PHI=PHI*TRARAD
      RHO=POLE/(2.*SIN(PHI/2.))
      BET1=TRARAD*BETENT
      BET2=TRARAD*BETSOR
      TGBET1=TAN(BET1)
      TGBET2=TAN(BET2)
      VITZ=SQRT(1.9161E+08*VA/AMASS)
      BOZ=10.438E-09*VITZ*AMASS/RHO
      DELZ=PHI*RHO
      AC(1)=Z
      AC(2)=Z
      CC(1)=Z

      CALL CURVE(AC,BC,2,0)
      WRITE(9,1032)RHO,BOZ
      TG1=TGBET1/RHO
      TG2=TGBET2/RHO
1032  FORMAT(3X,'FOCAL. AIMANT 2 PLANS***',3X,'RAYON=',E9.3,3X,
1      'B=',E9.3,/)
      WRITE(9,1000)
C      EFFET DE L'ANGLE D'ENTREE
      DO I=1,KMAX
      XP(I)=TG1*X(I)+XP(I)
      YP(I)=-TG1*Y(I)+YP(I)
      END DO
      Z=Z+DELZ/2.
      DO I=1,KMAX

      Y(I)=Y(I)+YP(I)*DELZ/2.
      END DO
      XMAX=ABS(X(1))
      YMAX=ABS(Y(NEX))
      DO K=1,NIJ
      IF(ABS(X(K)).GT.XMAX) XMAX=ABS(X(K))
      END DO
      DO K=NEX,KMAX-1
      IF(ABS(Y(K)).GT.YMAX) YMAX=ABS(Y(K))
      END DO
      ZZ=1000.*Z
      XXMAX=1000.*XMAX
      YYMAX=1000.*YMAX
      IF(XXMAX.GT.YMAXS.OR.YYMAX.GT.YMAXS)GO TO 999
      XPLOT(LPRT)=XXMAX
      YPLOT(LPRT)=YYMAX
      XRES(LPRT)=-1000.*X(KMAX)
      ZPLOT(LPRT)=Z
      LPRT=LPRT+1
      WRITE(9,1025)ZZ,XXMAX,YYMAX
      CP=COS(PHI)
      SP=SIN(PHI)
C      CES COEFFICIENTS SONT POUR UN AIMANT SANS INDICE.
      A11=CP

```



```

A12=RHO*SP
A13=RHO*(1.-CP)
A21=-SP/RHO
A22=CP
A23=SP
DO I=1,KMAX-1
XI=A11*X(I)+A12*XP(I)+A13*DELTVA(I)/(2.*VA)
XP(I)=A21*X(I)+A22*XP(I)+A23*DELTVA(I)/(2.*VA)
C   DELTA P/P=1/2 DELTA VA/VA
X(I)=XI
END DO
XP(KMAX)=XP(KMAX)+A23*DELTVA(KMAX)/(2.*VA)
X(KMAX)=X(KMAX)+A13*DELTVA(KMAX)/(2.*VA)
C   ATTENTION AUX SIGNES SI LES AIMANTS SONT TETE BECHE
DO I=1,KMAX

Y(I)=Y(I)+YP(I)*DELZ/2.
END DO
Z=Z+DELZ/2.
AC(1)=Z
AC(2)=Z
CC(2)=Z
      CALL CURVE(AC,BC,2,0)
      CALL RLMESS('A',1,Z-DELZ/2.,0.52*YMAXS)
      CALL RLREAL(10000.*BOZ,1,Z-DELZ/2.,-0.75*YMAXS)
      CALL CURVE(CC,DC,2,0)
      CALL CURVE(CC,EC,2,0)
XMAX=ABS(X(1))
YMAX=ABS(Y(NEX))
DO K=1,NIJ
IF(ABS(X(K)).GT.XMAX) XMAX=ABS(X(K))
END DO
DO K=NEX,KMAX-1
IF(ABS(Y(K)).GT.YMAX) YMAX=ABS(Y(K))
END DO
C   EFFET DE L'ANGLE DE SORTIE
ZZ=1000.*Z
XXMAX=1000.*XMAX
YYMAX=1000.*YMAX
IF(XXMAX.GT.YMAXS.OR.YYMAX.GT.YMAXS)GO TO 999
XPLOT(LPRT)=XXMAX
YPLOT(LPRT)=YYMAX
XRES(LPRT)=-1000.*X(KMAX)
ZPLOT(LPRT)=Z
LPRT=LPRT+1
DO I=1,KMAX
XP(I)=TG2*X(I)+XP(I)
YP(I)=-TG2*Y(I)+YP(I)
END DO
WRITE(9,1025)ZZ,XXMAX,YYMAX
GO TO 1

C-----
C   SECTEUR ELECTROSTATIQUE DE RAYON RAYO,D'ESPACE INTER-
C   ELECTRODES GAP,DE LONGUEUR ZL, DE RAYON D'ELECTRODE
C   TRANSVERSE RRO.POUR UN SECTEUR CYLINDRIQUE,FAIRE RRO=1.E+06.
C   SI LE SECTEUR EST TOROIDAL,RRO EST OBLIGATOIREMENT INFE-
C   RIEUR A RAYO/2.LES VALEURS DE POTENTIEL PLAQUE SONT CALCULEES
C   POUR UN SECTEUR CYLINDRIQUE.
C-----

```

```

7   READ(8,*)RAYO,GAP,ZL,RRO
    ZLD=1000.*ZL
    GAPI=1000.*GAP
    ERAYO=-2.*VA/RAYO
    RO=1000.*RAYO
    RRRO=1000.*RRO
    CCC=RAYO/RRO
    PHI=ZL/RAYO
    DEV=180.*PHI/3.14159
    RAYE=RAYO+GAP/2.
    RE=1000.*RAYE
    RAYI=RAYO-GAP/2.
    RI=1000.*RAYI
    VI=-2.*VA*ALOG(RAYO/RAYI)
    VE=-2.*VA*ALOG(RAYO/RAYE)
    WRITE(9,1028)ERAYO,GAPI,ZLD,DEV
    WRITE(9,1031)RO,RRRO,RE,RI,VE,VI
1028 FORMAT(/,3X,'DEVIATEUR ELECTRIQUE*****',3X,'CHAMP=',E12.3
1,3X,'ESPACE I.P.=' ,F5.1,3X,'LONGUEUR=' ,F7.1,3X,'DEVIATION=' ,
2F7.2,/)
1031 FORMAT(20X,'RO=' ,F7.1,3X,'ro=' ,F15.1,3X,'RE=' ,F7.1,3X,'RI=' ,
1F7.1,3X,'VE=' ,F10.1,3X,'VI=' ,F10.1,/)
    WRITE(9,1000)
    ZMAX=Z+ZL
    AC(1)=Z
    AC(2)=Z
    CC(1)=Z
        CALL CURVE(AC,BC,2,0)
    AC(1)=ZMAX
    AC(2)=ZMAX
    CC(2)=ZMAX
        CALL CURVE(AC,BC,2,0)
        CALL CURVE(CC,DC,2,0)
        CALL CURVE(CC,EC,2,0)
        CALL RLMESS('ED',2,AC(1)-ZL/2.,0.52*YMAXS)
        CALL RLREAL(VE,1,AC(1)-ZL/2.,-0.7*YMAXS)
    CEX=-(2.-CCC)/RAYO**2
    CEY=-CCC/RAYO**2
    CEZ=0.
    GO TO 56

C-----
C      DONNEES DU DESSIN DISSPLA
C-----
999  LPRTMX=LPRT-1
        CALL SETCLR('RED')
        CALL RESET('THKCRV')
        CALL CURVE(ZPLOT,XPLOT,LPRTMX,0)
    DO 200 I=1,LPRTMX
200  YPLOT(I)=-YPLOT(I)
C      POUR AVOIR LA TRACE EN Y SOUS L'AXE.
        CALL SETCLR('BLUE')
        CALL CURVE(ZPLOT,YPLOT,LPRTMX,0)
        CALL RESET('ALL')
        CALL HEIGHT(0.15)
        CALL SETCLR('CYAN')
        CALL RLMESS('PLAN HORIZONTAL',15,0.4*XMAXS,0.85*YMAXS)
        CALL RLMESS('PLAN VERTICAL',13,0.4*XMAXS,-0.85*YMAXS)
        CALL CHNDOT
        CALL SETCLR('MAGENTA')
        CALL CURVE(ZPLOT,XRES,LPRTMX,0)
C      CALL HEADIN(TITRE,40,3,1)

```

```

                CALL ENDPL(0)
                CALL DONEPL
WRITE(9,1003)(I,X(I),XP(I),Y(I),YP(I),I=1,KMAX)
CLOSE(8)
CLOSE(9)
END

C
SUBROUTINE CHELE(VOZ,D1VOZ,D2VOZ,Z)
C-----
C    CE SOUS-PROGRAMME INTERPOLE LES VALEURS DES CHAMPS
C    ET CALCULE LES DERIVEES
C-----
    DIMENSION VF(100)
    COMMON/BLOC1/VF,DU
C-----
C    SITUATION DE LA PARTICULE.
C-----
14  ZZREF=Z
    IF (ZZREF-0.0001) 400,400,298
298 N=INT(ZZREF/DU)+1
299 IF(N-1) 301,300,301
300 N1=N
    N2=N+1
    N3=N+2
    N4=N+3
    N5=N+4
    U=ZZREF/DU
    GO TO 307
301 IF(N-2) 299,302,303
302 N1=N-1
    N2=N
    N3=N+1
    N4=N+2
    N5=N+3
    U=ZZREF/DU
    GO TO 307
303 IF(N-3) 299,304,304
304 N1=N-2
    N2=N-1
    N3=N
    N4=N+1
    N5=N+2
    U=ZZREF/DU-FLOAT(N-3)
C-----
C    CALCUL DES COEFFICIENTS DE NEWTON-GREGORY.
C-----
307 REMP1=U
    REMP2=REMP1*(U-1.)/2.
    REMP3=REMP2*(U-2.)/3.
    REMP4=REMP3*(U-3.)/4.
    SH1= 1.-REMP1+REMP2-REMP3+REMP4
    SH2= REMP1-2.*REMP2+3.*REMP3-4.*REMP4
    SH3= REMP2-3.*REMP3+6.*REMP4
    SH4= REMP3-4.*REMP4
    SEMP2=(2.*U-1.)/2.
    SEMP3=(3.*U**2-6.*U+2.)/6.
    SEMP4=(4.*U**3-18.*U**2+22.*U-6.)/24.
    CH1= -1.+SEMP2-SEMP3+SEMP4
    CH2= 1.-2.*SEMP2+3.*SEMP3-4.*SEMP4
    CH3= SEMP2-3.*SEMP3+6.*SEMP4
    CH4= SEMP3-4.*SEMP4

```

```

C-----
C      CALCUL DU POTENTIEL ET DES CHAMPS SUR L'AXE
C-----
      YH1=SH1*VF(N1)
      YH2=SH2*VF(N2)
      YH3=SH3*VF(N3)
      YH4=SH4*VF(N4)
      YH5=REMP4*VF(N5)
      VOZ=YH1+YH2+YH3+YH4+YH5
      ZH1=CH1*VF(N1)
      ZH2=CH2*VF(N2)
      ZH3=CH3*VF(N3)
      ZH4=CH4*VF(N4)
      ZH5=SEMP4*VF(N5)
      D1VOZ=(ZH1+ZH2+ZH3+ZH4+ZH5)/DU
      VEMP3=U-1.
      VEMP4=(12.*U**2-36.*U+22.)/24.
      DDH1=(1.-VEMP3+VEMP4)*VF(N1)
      DDH2=(-2.+3.*VEMP3-4.*VEMP4)*VF(N2)
      DDH3=(1.-3.*VEMP3+6.*VEMP4)*VF(N3)
      DDH4=(VEMP3-4.*VEMP4)*VF(N4)
      DDH5=VEMP4*VF(N5)
      D2VOZ=(DDH1+DDH2+DDH3+DDH4+DDH5)/DU**2
      GO TO 401
400 VOZ=VF(1)
      D1VOZ=0.
      D2VOZ=0.
C-----
C      EZ ET ER EXPRIMES ICI N'ONT NI LES SIGNES NI LES COEFFICIENTS
C      CORRECTS. VOIR LE PROGRAMME PRINCIPAL.
C-----
401 RETURN
      END

```

TRANSPORT TANCREDE HDM1

\$DONNE

DZ=1.E-02,KMAX=33,NSTEP=10,VA=10000.,XMAXS=4.,
YMAXS=40.,AMASS=240.

\$END

0.000000	0.0060000	0.000000	0.000000	0.0
0.002500	0.0060000	0.000000	0.000000	0.0
0.002500	0.0000000	0.000000	0.000000	0.0
0.002500	-0.0060000	0.000000	0.000000	0.0
0.000000	-0.0060000	0.000000	0.000000	0.0
-0.002500	-0.0060000	0.000000	0.000000	0.0
-0.002500	0.0000000	0.000000	0.000000	0.0
-0.002500	0.0060000	0.000000	0.000000	0.0
0.000000	0.000000	0.000000	0.0060000	0.0
0.000000	0.000000	0.002500	0.0060000	0.0
0.000000	0.000000	0.002500	0.0000000	0.0
0.000000	0.000000	0.002500	-0.0060000	0.0
0.000000	0.000000	0.000000	-0.0060000	0.0
0.000000	0.000000	-0.002500	-0.0060000	0.0
0.000000	0.000000	-0.002500	0.0000000	0.0
0.000000	0.000000	-0.002500	0.0060000	0.0
0.000000	0.0060000	0.000000	0.000000	-1000.0
0.002500	0.0060000	0.000000	0.000000	-1000.0
0.002500	0.0000000	0.000000	0.000000	-200.0
0.002500	-0.0060000	0.000000	0.000000	-200.0
0.000000	-0.0060000	0.000000	0.000000	-200.0
-0.002500	-0.0060000	0.000000	0.000000	-200.0
-0.002500	0.0000000	0.000000	0.000000	-200.0
-0.002500	0.0060000	0.000000	0.000000	-200.0
0.000000	0.000000	0.000000	0.0060000	-200.0
0.000000	0.000000	0.002500	0.0060000	-200.0
0.000000	0.000000	0.002500	0.0000000	-200.0
0.000000	0.000000	0.002500	-0.0060000	-200.0
0.000000	0.000000	0.000000	-0.0060000	-200.0
0.000000	0.000000	-0.002500	-0.0060000	-200.0
0.000000	0.000000	-0.002500	0.0000000	-200.0
0.000000	0.000000	-0.002500	0.0060000	-200.0
0.0	0.0	0.0	0.0	-100.

1

0.5

3

10000.,2.E-03,45

0.138,0.282,0.438,0.615,0.82,1.061,1.351,1.7,2.126,2.644,3.277,
4.05,4.991,6.133,7.514,9.171,11.145,13.472,16.183,19.295,22.809,
26.703,30.903,35.43,40.11,44.876,49.63,54.281,58.749,62.971,
66.902,70.511,73.785,76.72,79.322,81.604,83.581,85.272,86.694,
87.865,88.8,89.513,90.015,90.313,90.411

1

0.1

2

-100,0.05,0.2

1

0.4

5

51.,0.4,9.0,9.0

1

1.5

999